

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Ympäristötekniikan koulutusohjelma
Ylempi ammattikorkeakoulututkinto

Keijo Rekorius

PIENTUULIENERGIAN HYÖDYNTÄMINEN ERILLISKOhteissa

Opinnäytetyö
Marraskuu 2013



OPINNÄYTETYÖ
Marraskuu 2013
Ympäristötekniikan
koulutusohjelma
Ylempi ammattikorkeakoulututkinto

Sirkkalantie 12A
80200 JOENSUU
p. +358(0)13 260 6900

Tekijä
Keijo Rekorius

Nimeke
Pientuulienergian hyödyntäminen erilliskohteissa

Toimeksiantaja

Tiivistelmä

Tämän kehityshankkeen tarkoitus oli Pohjois-Karjalan ilmasto- ja energiaohjelma 2020:ssä ilmaistun pientuulivoimalatavoitteen saavuttamiseksi selvittää pystyakselisten (VAWT) pientuuliturbiinien soveltuvuutta erilliskäyttöinä haja-asutus- sekä taajama-alueella.

Työssä on tarkasteltu ilmastollisia tekijöitä ja niiden vaikutusta kyseisten pientuuliturbiinien energiasisältöön. Tavoitteena oli tutkia ja löytää kriteerit soveltuvimpien asennuspaikkojen löytämiseksi pientuulivoimaloille mainituissa kohteissa.

Tutkimusosassa selvitettiin pystyakselisten tuuliturbiinien erikoisominaisuudet, toiminta-alueet sekä soveltuvien mallien saatavuus kotimaisilta että kansainvälisiltä markkinoilta selvitettiin. Lisäksi tutkittiin soveltuviksi todettujen tuuliturbiinimallien asentamiseen liittyvää lupamenettelyä Suomessa sekä käyttöympäristön rakenteissa huomioitavia tekijöitä.

Tutkimus perustui kirjallisuuteen sekä alan yhteisöjen ja yritysten materiaaliin, johon kirjoittajalla oli mahdollisuus työnsä puolesta lähemmin tutustua ja seurata työn aikana.

Työn lopputuloksena voidaan todeta, että käsitellyn tiedon perusteella pientuulivoimala-ala on vielä hyvin pioneerivaiheessa. Markkinoilta löydettävät ratkaisut vaativat vielä jatkokehitystä ja pilotointia, jotta käsitellyllä tuotantomuodolla on merkitystä pientuulivoimalatavoitetta täyttäessä.

Kieli
suomi

Sivuja	54
Liitteet	7
Liitesivumäärä	15

Asiasanat
Tuulienergia, pientuulivoimala, pystyakseli tuulivoimala



THESIS
November 2013
Degree Program in Environmental
Technology, UAS Master's Degree

Sirkkalantie 12A
FI 80200 JOENSUU
FINLAND
Tel. +358(0)13 260 6900

Author
Keijo Rekorius

Title
Use of Small Wind Energy in Stand-Alone Applications

Commissioned by

Abstract

The purpose of this development project was, in accordance with the target of the North Karelia Climate and Energy Program 2020, to determine the vertical axis wind turbine's (VAWT) suitability as a stand-alone application in sparsely populated areas and in built-up areas.

The study examined broader climatic factors and their impact on the local micro wind assessment. The target was to investigate and find criteria for suitable installation sites designated for small wind power plants.

Vertical axis wind turbines' special features, range of operation, and the availability of suitable models on domestic as well international markets were investigated. In addition, the study investigated the authorisation process related to the assembly of applicable wind turbine models in Finland as well as factors related to structures in the operating environment.

The study was based on literature and material from industrial communities and companies which the author had an opportunity to acquaint himself with and monitor during process.

As a conclusion of this thesis, it can be stated that the small wind industry is still at a very pioneering stage. The existing solutions on the market still require further development and piloting to achieve the application specified in the program above.

Language	Pages	54
Finnish	Appendices	7
	Pages of Appendices	15

Keywords
wind energy, small wind power plant, Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)

Sisältö

Tiivistelmä

Abstract

1.	Johdanto.....	5
2.	Opinnäytetyön tavoitteet ja menetelmät.....	7
3.	Tuuli energian lähteenä	8
3.1	Tuulen alkuperä	8
3.2	Paikalliset tekijät	13
3.3	Tuulen esiintyminen – Tuuliatlas.....	18
3.4	Tuulienergian teho	23
4.	Tuuliturbiinitekniikka	26
4.2	Pystyakseliturbiinit	29
4.3	Savonius-turbiini	30
4.4	Darrieus-turbiini	33
4.5	Hybridiratkaisut.....	36
4.6	VAWT-tuuliturbiinien soveltuvuus pientuotannossa	37
4.7	H-VAWT-tuuliturbiinien saatavuudesta	39
4.8	Pientuulivoimalakohteita	41
5.	Pientuulituotannossa huomioitavaa	42
5.1	Lupamenettelyt	42
5.2	Tuulivoiman vastustus	44
5.3	Suunnittelussa ja valinnoissa huomioitavia asioita	46
5.4	Huolto ja operointi.....	48
6.	Yhteenveto.....	49
6.1	Tulosten tarkastelu	49
6.2	Pohdinta	50
6.3	Liiketoimintaan liittyvät mahdollisuudet.....	51
	Lähteet.....	53

Liitteet

Liite 1 Markkinoilta löytyvät H-VAWT Tuuliturbiinit

Liite 2 Markkinoilta löytyvät kotimaiset VAWT Tuuliturbiinit

Liite 3 Kattoturbiiniasennuksia

Liite 4 Kanavatyyppiset rakenteet

Liite 5 Ruotsin H-VAWT kokeilut

Liite 6 Jakokosken Tähtikallio

Liite 7 Karelia AMK Sirkkalan kampus

Lyhenneluettelo

AROME	Ilmatieteen laitoksen käyttämä maaston huomioon ottava suomen ja sen lähialueita kuvaava säämalli
Cp	Tuuliturbiinin hyötysuhdetta kuvaa laaduton lukuarvo
dBA	Matemaattisesti painotettu suhteellinen äänenvoimakkuusyksikkö, jonka kuvaa ihmisen korvan herkkyyttä kuuluvuudelle; sovelletaan koska korva on vähemmän herkkä pieni äänitaajuuksille
HAWT	Vaaka-akselinen / vaakaroottorinen tuuliturbiini (Horizontal Axis Wind Turbine)
HIRLAM	Ilmatieteen laitoksen kahden vuorokauden ennusteiden tuottamiseen käyttämä säänennustusmalli (High Resolution Limited Area Model)
H-VAWT	H-roottorinen pystyakselinen tuuliturbiini
MVA	Megavoltttiampeeri
TSR	Tuuliturbiinin siiven kärkinopeussuhde (Tip Speed Ratio)
VAWT	Pystyakselinen / pystyroottorinen tuuliturbiini (Vertical Axis Wind Turbine)
WAsP	Tanskalaisen Risö DTU:n Tuulienergia Divisioonan kehittämä PC-ohjelmisto tuulienergian laskentaan (Wind Atlas Analysis and Application Program)

WMO	Maailman meteorologinen katto-organisaatio (World Meteorological Organization)
WWEA	Kansainvälinen tuulienergia-alan yhteisö (World Wind Energy Association)

1. Johdanto

Nykyisten tuulipuistojen rakentamista hidastavat byrokratia ja ympäristöselvitykset, jotka toistuvat useassa vaiheessa. Hankkeissa on huomioitava lepakot ja kotkat, vaikka niiden esiintyminen olisi vain oletus. Tuulivoimaloista ei saa kuulua ääntä (ympäristöministeriön ohjeen mukaan desibelitaso ei saa olla yli 35 desibeliä). Armeija pelkää tuulivoimaloiden häiritsevän tutkatoimintaa, ja paikalliset asukkaat vastustavat tuulivoimalahankkeita maiseman esteettisyyden vuoksi. Hankkeita hidastavat myös hallinto-oikeuksiin tehdyt valitukset, joissa selvitetään, onko voimalapäätökset tehty lainmukaisessa järjestyksessä.

Pohjois-Karjalan potentiaaliset tuulivoiman tuotantopaikat on kartoitettu osana Sisä-Suomen tuulivoimaselvitystä (Pohjois-Karjalan Maakuntaliitto 2011a). Tämän selvityksen lisäksi Pohjois-Karjalan ilmasto- ja energiaohjelma 2020 haluaa nopeuttaa maakunnassa hajautetun soveltuvan pientuulivoiman käyttöönottoa maataloilla ja erilliskohteissa. Kyseisten mahdollisten pientuulivoimaloiden lukumäärää ja tuotantotavoitetta on selvityksessä ”haarukoitu”, mutta miten kyseinen tavoite saavutetaan, ohjelma ei erittele. (Pohjois-Karjalan Maakuntaliitto 2011b.)

Kyseisiä pientuulivoiman käytön kohteita, jotka sijaitsevat jakeluverkon ääripäässä tai kokonaan ulkopuolella, ovat tyypillisesti kiinteistöjen valaistus, lämmön tuotanto (varaajat), vesipumput, varalatausjärjestelmät (tietoliikenne), maataloilla eläinten hoitoon liittyvät laitteet (lypsyautomaatit), sekä tulevaisuudessa myös paikalliset sähkön varastointijärjestelmät ja kulkuneuvot (hybridi-/sähköautojen akut). Itsenäisellä pientuotannolla on merkitystä omavaraisuuteen ja huoltovarmuuteen energialähteenä myrskyalttiilla alueella pitkien siirtoyhteyksien päässä. Samoille ratkaisuille voidaan toisaalta löytyä myös käyttöä taajamissa öljylämmitysjärjestelmiä korvattaessa uusilla energiaratkaisuilla, osana useamman eri energialähteen hybridiratkaisua (maalämpö, aurinkolämpö/-sähkö, bioenergiaratkaisut).

Pientuotannon synnyttämisellä on myös laajempi yhteiskunnallinen ulottuvuus. Pientuotannon ja siihen liittyvien rakentamis-, asennus, huolto- ja palveluliiketoimintojen on kansainvälisesti katsottu mahdollistavan uusien paikallisten työpaikkojen muodostumisen, sekä kannustavan kuluttajia energiaa säästävämpään kulutukseen (energialukutaito).

Tuulienergia merkitsee tuulen eli ilmapvirran liike-energian muuntamista tuuliturbiinin avulla sähköenergiaksi edelleen hyödynnettäväksi. Tuulienergia, se on uusiutuvaa energiaa, josta ei synny päästöjä ja sen polttoaine on ilmaista. Tuulisähkön tuotto vaihtelee vallitsevan sään ja sijoituspaikan mukaan.

Sähkömarkkinalain mukaisesti sähköenergian pientuotannolla tarkoitetaan tuotantojärjestelmiä, joiden maksimi teho on 2 MVA (Sähkömarkkinalaki 1995). Alaa säätelevä standardi (IEC 61400-2) määrittelee pientuuliturbiinin maksimi pyyhkäisypinta-alaksi 200 neliömetriä sekä sähköiseksi antotehoksi alle 100 kW. Tällaisten rakenteiden osalta lainsäädäntö ei kuitenkaan ole yksiselitteinen, miten kyseistä pientuulivoimaa voidaan rakentaa minnekin. (Sitra 2012.)

Yleisesti voidaan myös todeta, etteivät uusiutuvan energian syöttötariffit Suomessa nykyisellään kannusta pientuottajan sähköenergian ylijäämän syöttämistä jakeluverkkoon. Verkkoon liittämisen käytännöt ovat eri verkkoyhtiöillä hyvinkin erilaisia, ja vaativat asioidessa byrokratian tuntemusta. Tämä ei kohtelee kuluttajia tasavertaisesti.

Tämän opinnäytetyön aiheena on edellä mainitun mukaisesti selvittää pientuulivoiman hyödyntämistä pystyakselisilla tuuliturbiinimalleilla paikallisen energian tuottamiseen erilliskohteissa, joita ovat maatilat ja taloyhtiöt haja-asutusalueella, sekä mahdollisesti myös taajamissa (kaupunkialueet). Lähestyminen rajaa pois niin kutsutun mikrotuotannon, jolla tarkoitetaan yksittäisten laitteiden sähkön saantia (esimerkiksi tukiasemamastot) tai ajallisesti rajatun käytön (vapaa-ajan asunnot, mökkikäytöt).

2. Opinnäytetyön tavoitteet ja menetelmät

Tuulienergian hyödyntäminen aihealueena on poikkitieteellistä, perustuen ilmakehätieteisiin (meteorologia, klimatologia) sekä alan insinöörityeteisiin (aerodynamiikka, mekaniikka, sähköoppi).

Opinnäytetyön tavoitteena oli kyseisiin tieteisiin pohjautuen

- a) määrittää oleellisia meteorologian laadullisia menetelmiä, miten yksittäisissä käyttökohteissa (asennuspaikalla) voidaan maksimoida tuulesta saatava energia
- b) selvittää määrällisesti markkinoilla olevien pientuulivoimaloiden (pystyakselituuliturbiinit) teknisten tietojen avulla, onko tarkastelun mukaisesti soveltuvia turbiineita saatavilla
- c) selvittää, mitä lainsäädännöllisesti ja yleisesti tulee huomioida kyseisiä tuuliturbiiniasennuksia suunniteltaessa.

Opinnäytetyön primääritieto perustuu alan tutkimusartikkeleihin sekä organisaatioiden ja yritysten raportteihin ja dokumentaatioon. Sekundäärisenä tietolähteenä on kirjallisuus meteorologiasta sekä tuulivoimatekniikasta.

Tutkimusartikkeleiden haussa on voitu käyttää IEEE Xplore -tietokantaa¹ kirjoittajan työnantajan luvalla. Tieto käsiteltävien pientuuliturbiinien määrällisestä saatavuudesta ja tekniikasta perustuu kansainvälisen tuuliorganisaation, WWEA, vuosittaiseen raporttiin, jonka sisällöstä on rajattu käsittelyyn soveltuvimmat mallit ja toimittajat (344 pienturbiinitoimittajaa).

Kootun tietosisällön avulla työssä tarkastellaan erilaisia pientuulivoimala sovelluskohteita (liitteet), toteutettuja sekä suunnitteilla olevia, lähinnä pystyakselisten (VAWT) tuuliturbiinien näkökulmasta.

¹ Tietolähde sisältää yli 3 miljoonaa tekstidokumenttia IEEE julkaisuista, konferensseista ja standardeista. (Haku tehty 30.10.2012)

3. Tuuli energian lähteenä

3.1 Tuulen alkuperä

Auringon säteilemän energian lämmittävä vaikutus maanpinnalla on alkuna kaikille havaittaville sääilmiöille. Se kattaa 99.97 % maailmakehäsystemin fysikaalisista prosesseista tarvittavasta lämpömäärästä. Tuleva säteily sekä maanpinnan takaisin heijastama säteily muodostavat ilmakehään termodynaamisen koneen, jossa energia kosteuteen (vesihöyry) sitoutuen vaihtaa muotoaan koko ajan.

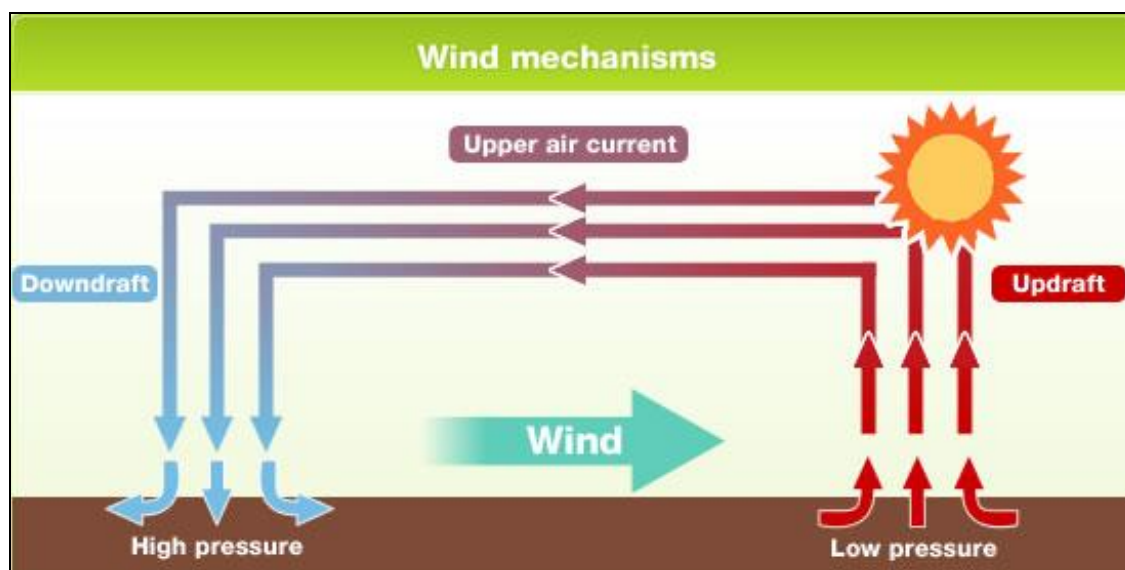
Ilmakehän tärkeimmät energiamuodot havaintojen mukaisesti ovat

- sisäinen energia (lämpötila)
- potentiaalienergia (korkeus merenpinnasta)
- liike-energia (tuuli)
- latentti lämpö (vesihöyrysisältö).

Keskiarvoja tarkastellen voidaan todeta, että liike-energian osuus tässä systeemissä on kuitenkin hyvin pieni, vain noin 1,5 % (5 W/m^2) verrattuna saapuvaan kokonaissäteilyyn (340 W/m^2). (Karttunen, Koistinen, Saltikoff & Manner 2002, 97–103.)

Ajallisesti ajateltuna aurinko lämmittää vain maapallon päivän puoleista osaa ja siten virtaukset, kineettisen energian osuus, saavat alkunsa lämmityksen epätasaisesta jakaumasta. Lisäksi maapallon liike, pinnan muodot, mantereisuus sekä vuodenajan vallitsevat olosuhteet muokkaavat suuren ilmakehän kaaottisessa tilassa havaittavaa tuulta. Maa myös säteilee jatkuvasti lämpöä ilmakehään, jonka se on alun perin vastaanottanut auringosta, mutta ei tasaisesti joka puolella maapalloa samanaikaisesti. Alueilla, joissa vapautumista tapahtuu vähemmän (kylmillä alueilla) ilmakehänpaine lisääntyy, kun taas toisilla alueilla missä vapautuminen on suurempaa, ilmanpaine vähenee. Tämä

ilmiö saa aikaiseksi ilmakehän korkea- ja matalapainealueet ja virtauksen niiden välillä (kuva 1). (Karttunen ym. 2002, 167–171.)



Kuva 1. Tuulen synty ilmakehän kierrossa matalapaineen alueelta korkean paineen alueelle. (Hitachi 2013.)

Tuulet saavat tässä systeemissä alkunsa vaakasuuntaisista paine-eroista, jotka synnyttävät ns. paine-ero- eli painegradienttivoiman. Tämä voima suuntaa korkeammasta matalampaan paineeseen ja on sitä suurempi, mitä jyrkemmin paine muuttuu vaakasuunnassa. Painegradientteja kuvataan sääkartoilla paineen *samanarvonkäyrillä*, ns. *isobaareilla*. Vapaassa ilmakehässä tätä virtausta kutsutaan *Geostrofiseksituuleksi*, joka on sitä voimakkaampaa, mitä tiheämmässä paineen samanarvonkäyrät ovat. (Karttunen ym. 2002, 168–169.)

Geostrofinen tuuli ei kuitenkaan pääse virtaamaan suoraan korkeapaineesta matalapainetta kohti, sillä siihen vaikuttaa maapallon pyörimisestä johtuva ns. *Coriolis-* eli näennäisvoima, joka kasvaa leveysasteiden kasvaessa ja on sitä voimakkaampi, mitä suurempi on tuulen nopeus. Pohjoisella pallonpuoliskolla Coriolis-voima kääntää tuulta oikealle ja eteläisellä pallonpuoliskolla vasemmalle. Se estää korkeilla leveysasteilla paine-erojen tasoittumista, minkä vuoksi matalapaine ei voi välittömästi täyttyä. Tämän takia korkeilla leveysasteilla syntyy toisinaan voimakkaita matalapaineita. Vastaavasti tropiikissa paine-erot pääsevät tasoittumaan, koska Coriolis-voima on siellä lähes olematon, eikä syviä matalapaineita esiinny. (Karttunen ym. 2002, 169.)

Vapaassa ilmakehässä ns. *rajakerroksen* yläpuolella (noin 1...2 km korkeudessa), missä maanpinnan aiheuttama kitka ei enää vaikuta, valitsee yleensä varsin tarkkaan ns. geostrofisen tasapaino paine-erovoiman ja coriolisvoiman välillä. Tuuli on tällöin paineen samanarvonkäyrien suuntaista siten, että matalapaine jää pohjoisella pallonpuoliskolla tuulen vasemmalle ja eteläisellä oikealle puolelle. (Räisänen 2004.)

Ilmakehän rajakerros (atmospheric boundary layer, ABL) määritellään väljästi kerrokseksi, jossa alustan ominaisuudet suoraan vaikuttavat ohivirtaavaan ilmaan ja pitävät virtauksen *turbulenttisena*. Sen yläpuolella (vaihdellen 100...1000 m korkeudesta alkaen) on vapaa ilmakehä, jossa turbulenttisuus on heikkoa ja tuuli (ns. ylätuuli) on likimain geostrofista. Rajakerroksen turbulenttisuutta edistävät voimakas ylätuuli, alustan rosoisuus ja topografia (mekaaninen turbulenssi) sekä alustan lämpöisyys (ylösvirtaus, terminen turbulenssi). (Räisänen 2004.)

Rajakerroksen alin osuus (n. 10 %) on nimeltään *pintakerros*, jossa keskituuli on kääntynyt pintakitkan takia maalla 20...30 astetta poikki isobaarien kohti matalampaa painetta ja on noin 50 % ylätuulesta. Sileällä merellä vastaavat arvot ovat 12...17 astetta ja 70 %. Niinpä maa-alueilla tuulee heikommin kuin merellä. Nämä peruspiirteet näkyvät mm. sääkartoilla. (Savijärvi & Vihma 2001.)

Myös lämpötilan pystyjakauma pinnan lähellä vaikuttaa pintatuulen nopeuteen. Etenkin kesällä tuulee yleensä voimakkaammin päivällä kuin yöllä. Vastaavasti talvella tuulee voimakkaammin sulan kuin jääpeitteisen meren/järven yllä. Kitkan aiheuttaman turbulenttisen sekoittumisen vuoksi tuuli on myös pinnan lähellä puuskaista, joka on huomioitava tuulienergia sovelluksissa. (Räisänen 2004.)

Kaasut eivät myöskään sellaisenaan virtaa kitkattomasti ilmakehässä, vaan niissä vaikuttaa niiden oma viskositeetti. Maanpinta jarruttaa alempien ilmakerrosten virtausta rosoisuuden takia (kitka). Tämä hidastuvuus näkyy myös ylemmissä ilmakerroksissa viskositeetin ansiosta ja luo tuulelle vertikaalin profiilin, missä nopeus kasvaa ylöspäin. Mikäli tietynä hetkenä havainnoksi

saadaan esimerkiksi 6 m/s:n tuulennopeus, voi vertikaalin jakauma olla taulukon 1 mukainen. (Karttunen ym. 2002, 33–37.)

Taulukko 1. Esimerkillinen jakauma kesäisenä päivänä (Karttunen ym. 2002, 169).

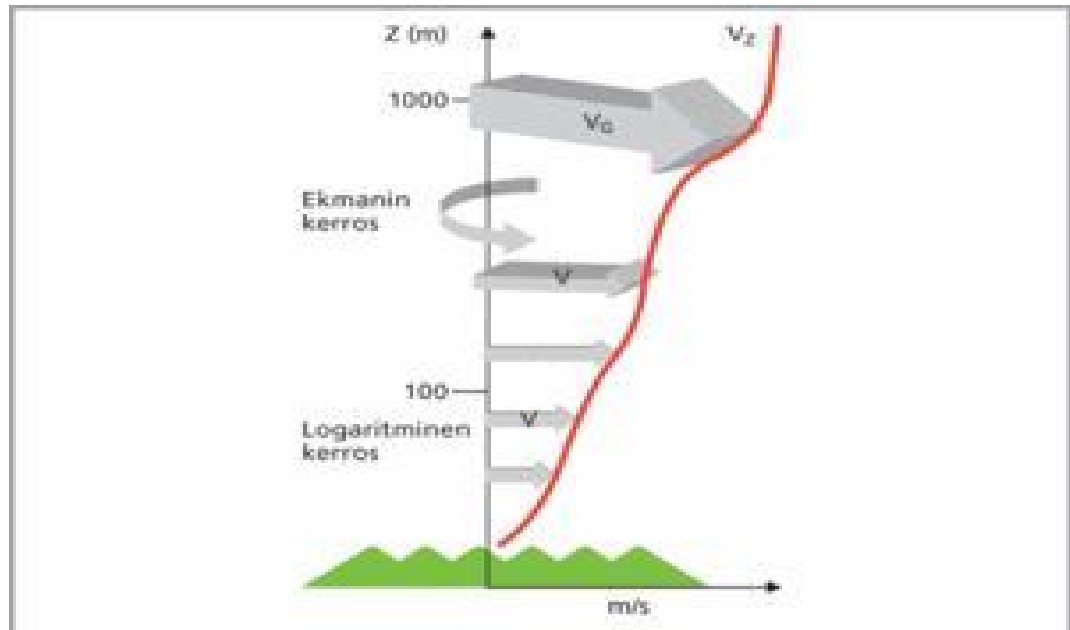
korkeus	tuulen nopeus
10 cm	0.1 m/s
1 m	3 m/s
10 m	6 m/s
100 m	10 m/s
1 km	12 m/s

Tuulta, sen nopeutta ja suuntaa, mitataan maanpinnalla vakioidusti (WMO:n suosituksen mukaan) 10 metrin korkeudella 10 minuutin keskiarvona (sääasemahavainnot). Nopeus ilmoitetaan metreinä sekunnissa (m/s) ja suunta asteina, 3 asteen tarkkuudella.

Tuulivoiman tuotannossa suurten tuulivoimaloiden turbiinit sijaitsevat rajakerroksessa, jossa mesoskaalan paine-erogradientin ohella alustan rosoisuus, rajakerroksen lämpötilakerrostuneisuus ja ilmakehän dynamiikka määräävät rajakerroksen tuulen voimakkuuden. (Savijärvi & Vihma 2001.)

Edellä mainittujen rajakerroksen ylärajan ja pintakerroksen eli rajakerroksen alimman osan välille muodostuu niin sanottu Ekmanin kerros, jossa tuulen nopeuden suunta muuttuu ja heikkenee korkeuden pienentyessä pintakitkan vaikutuksesta. Tuulen nopeus heikkenee jokseenkin logaritmisesti suunnan pysyessä melkein samana pintakerroksessa (kuva 2).

Kyseinen tuulen kääntyminen ei vaikuta vielä nykyisten tuulivoimaloiden toimintakorkeudessa, mikä voi olla mahdollisesti tulevien 10 MW voimaloiden tullessa markkinoille noin 10 vuoden kuluttua.



Kuva 2. Ekman-spiraali rajakerroksessa (Savijärvi & Vihma 2001).

Kuten aiemmin on esitetty ja nähdään myös kuvassa 2, tuulen nopeus käyttäytyy logaritmisesti korkeuden suhteen, Lähellä pintaa siihen vaikuttaa toisaalta pinnan rosoisuus, jota kuvataan ladottomalla kokeellisella lukuarvolla. Mikäli pinnan olosuhteet tunnetaan ja tuulen nopeus on jollain korkeudella tunnettu, voidaan tuulen nopeus myös toisessa pisteessä laskea tätä referenssinä käyttäen kaavasta:

$$v_z = v_{z0} * \left(\frac{z}{z_0} \right)^\alpha$$

v_{z0} = tuulen nopeus referenssikorkeudella z_0 [m/s];

z_0 = referenssikorkeus [m];

α = laaduton lukuarvo, joka kuvaa alustan rosoisuutta, rosoisuusparametri (British Wind Energy Association 1982, 4).

Taulukko 2. Esimerkkejä rosoisuusluokista. (British Wind Energy Association 1982.)

Rosoisuusluokka	Maastontyyppi	α
0	avoin vesialue	0.1
1	avoin maasto	0.15
2	haja-asutusalue	0.2
3	taajama / metsät	0.3

3.2 Paikalliset tekijät

Mesoskaalan ilmiöt ovat karkeasti 1...1000 km laajuudeltaan ja 1h...2 vrk kestoaltaan, joten joukkoon kuuluu hyvin monenlaisia sääilmiöitä. Tuulihavaintojen aikasarjojen taajuusanalyysillä voidaan havaita, että varsinkin maanpinnan lähellä mesoskaalassa on yleensä vain heikohkoja tuulia. Kuitenkin monissa mesoskaalan ilmiöissä, sitten kun niitä esiintyy, pintatuulet voivat olla todella rajuja hetkellisesti. Paikallisen sään kannalta monet mesoskaalan heikot, mutta systemaattiset virtausilmiöt ovat tärkeitä huomioida, etenkin rannikoilla ja vuoristoalueilla. (Räisänen 2004.)

Ilmasto riippuu myös huomattavasti maaston korkeussuhteista. Korkeuden kasvaessa auringon suoranainen säteily lisääntyy, ilmanpaine vähenee, lämpötila laskee, ilman kosteus vähenee ja tuulen nopeus kasvaa, jotka kaikki ovat huomioitavia asioita tuulivoima sovelluksissa.

Mesoskaalan ilmiöt voidaan jakaa aiheuttajansa puolesta kahteen tyyppiin:

1. Maaston aiheuttamat topografiset ilmiöt, kuten

- maa/merituuli ja muut rannikkoilmiöt
- rinne/laaksotuuli
- vuoristoaallot, vuoristo-/tunturituulet
- kaupunki- ja muut lämpösaareke-efektit

2. Säätilan aiheuttamat ilmiöt, kuten

- rintamien sateet ja hienorakenne
- ukkoset ja kuuroalueet
- syöksyvirtaukset ja pyörteet
- polaarimatalat

(Räisänen 2004.)

Mesoskaalan topografisia tekijöitä ovat laaksot ja solat. Esimerkkinä mesoskaalan ja mikroskaalan ilmiöistä ovat kylmän ilman valuminen kaltevalla

maalla (yöllinen jäähtyminen, vuorituuli) sekä vastaava lämpimän ilman nousuvirtaus (auringon lämmittäessä laaksoa päivällä, laaksotuuli).

Toinen merkittävä tekijä on merten ja mannerten, jopa järvien ja maan vaikutus rannikon ilmastoon. Syynä erilainen lämpeneminen auringon säteilyn vaikutuksesta ja tätä seuraavat nousu- ja laskuvirtaukset, jotka saavat aikaan kiertoliikkeen pintojen välillä. Maa-merituuli-ilmiö on tuttu myös suomen rannikkoalueilla. (Räisänen 2004.)

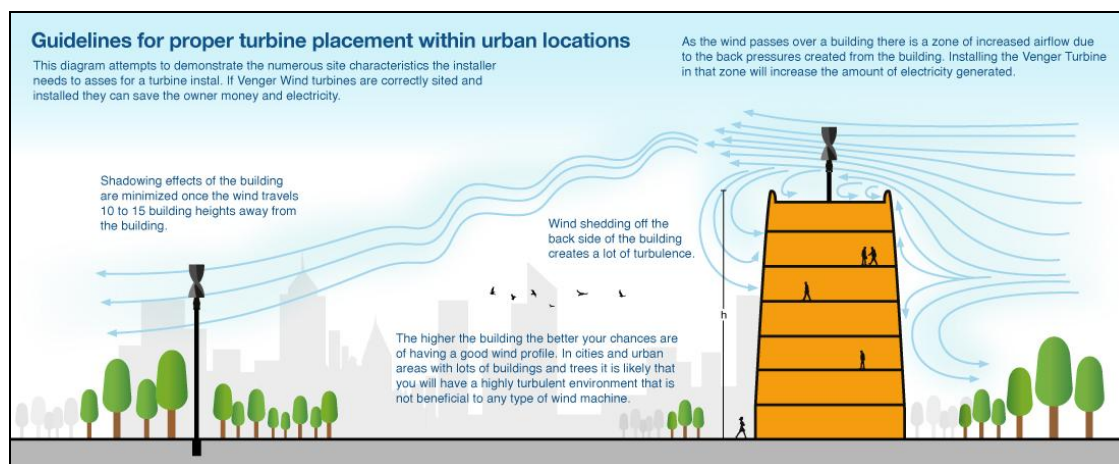
Paikallisesti pintakerroksessa maaston muodot vaikuttavat erittäin paljon ilmapvirtaukseen. Ns. *orografinen rosoisuus*, joka tulee maaston muodoista, vaikuttaa tuulen suuntaan ja nopeuteen. *Aerodynaaminen rosoisuus*, joka tulee pinnan laadusta, taas pyrkii jarruttamaan ilmapvirtausta. Alustan rosoisuutta kuvataan rosoisuusparametrillä Z_0 , jonka yksikkö on metri. Hyvin rosoisina pintoina voidaan pitää kaupunkeja, jyrkkäseinäisiä rinteitä ja korkeiden metsien reuna-alueita. Vesi-, jää- ja lumipeitteitä pidetään jokseenkin sileinä pintoina. (Savijärvi & Vihma 2001.)

Myös vuodenajat vaikuttavat tietyn alueen pinnan rosoisuuteen. Suomi sijaitsee maapallon länsivirtausten säähäiriöiden alueella, jossa ilmanpaineessa ja tuuliolosuhteissa on suuria vaihteluita, varsinkin vuoden talvipuoliskolla. Yleisimmin koko maassa tuulee lounaasta ja harvimmin koillisesta, muuten tasaisesti kaikista ilmansuunnista. Tuulen keskinopeus sisämaassa on 3...4 m/s (10m keskituuli 10 min.), rannikolla hieman suurempi ja merellä 5...7 m/s. suurimmillaan tuulen nopeus on talvella ja pienimmillään kesällä. Varsinaisia myrskytuulia (>21 m/s) esiintyy vain avomerellä joitain kertoja vuotuisesti syksyllä ja talvella, sisämaassa ei lainkaan. Kesäiset ukkospuuskat saattavat olla haitallisia sisämaassa toisinaan niiden sisältämien voimakkaiden alaspäin purkautuvien virtausten muodossa. (Heino 1997.)

Paikallisiin sääilmiöihin kuuluu myös *kaupunkien lämpösaareke* ilmiöt, jossa nousevaliike vetää ilmaa ulkopuolelta synnyttäen paikallisia virtauksia (katukuilut, kanavoituminen, kaupunkituulisolut). Suurehko kaupunki on lämpösaareke, syynä tummat asfalttipinnat, rakennusmassat, lämmitys, teollisuus ja liikenne. Etenkin yöllä sen yhteyteen syntyy pintavirtaus kohti

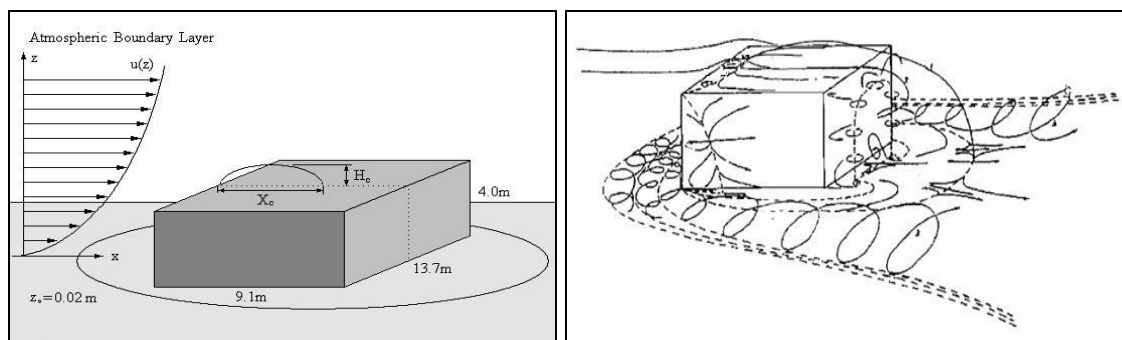
lämmintä keskustaa. Lämpötilaero ympäröivään maaseutuun on useita asteita, miljoonakaupungeissa jopa 8...12 celsius-astetta, Helsingissäkin jopa 6 astetta. Tästä syystä kaupungin yllä on nousevaa liikettä ja paluuvirtausta 0,5...1 km korkeudella ympäröivään alueeseen. Kokonaisvirtaus voi myös voimistua meri- ja rinne tuulien myötä sijainnista riippuen. (Savijärvi & Vihma 2001.)

Mikroskaalassa kaupungin tuulia dominoi katukuilujen ja rakennusten aiheuttama monimuotoinen mekaaninen turbulenssi. Massa pyrkii säilymään, joten rakennusten taakse muodostuu jättöpyörteilyä, puuskia, kovatuulisia ja tyyniä kohtia. Avoimella paikalla puhaltavan tuulen nopeus kasvaa sen ahtautuessaan kaupungin katukuiluihin. Toisaalta korkeat rakennukset, yhtä hyvin kuin metsän reunat, kumpuileva maasto ja muut vastaavat haittaavat ilmassa tasaista etenemistä sekä aiheuttavat turbulenssia ja paikallisia nousevia virtauksia. Kuvassa 3 on nähtävissä virtauksen monimuotoisuus korkean rakennuksen ympäristössä.



Kuva 3. Virtauskentät rakennuksen ympärillä. (Vengerwind 2013.)

Kyseisten hyvin lyhytaikaisten virtausten arvioiminen ja mittaaminen luonnossa on hyvin haastavaa. Virtausten etenemiseen eri rakenteiden kohdalla on esitetty monenlaisia virtausteknisiä tietokonemallinnuksia, yleensä tieteellisinä raportteina, mutta yleispäteviä työkaluohjelmia ei ole kaupallistunut. Kuvassa 4 havainnoidaan tyypillisen teoreettisen vertikaalisen tuuliprofiilin lähestymistä rakenteeseen ja miten virtausta on mallinnettu tietokone ajolla osuman jälkeen.



Kuva 4. Tuulipatsaan virtaukset osuessaan rakennukseen. (Savijärvi & Vihma 2001.)

Määrittelyltään *turbulenssi* on virtauksen nopeaa epäsäännöllistä vaihtelua ajan suhteen. Vaihtelut ovat kolmiulotteisia ja lisäävät ilman sisäistä sekoittumista, jonka seurauksena lämmönsiirto ja pitoisuuksien sekoittuminen tehostuvat huomattavasti. Turbulenssin syntymekanismit ovat termisiä ja mekaanisia. Terminen turbulenssi aiheutuu ilman tiheyden pystysuuntaisesta vaihtelusta. Se aiheutuu erityisesti kun maan- tai merenpinta on ilmaa lämpimämpi, ja pinnan lähellä lämmennyt ilma pyrkii kohoamaan ylöspäin. Ilman jäähtyminen esimerkiksi pilven ylärajalla saa myös aikaan termistä turbulenssia, jossa jäähtynyt ilma pyrkii vajoamaan alaspäin. Terminen turbulenssi pienenee suurilla tuulen nopeuksilla. Mekaaninen turbulenssi riippuu toisaalta maaston rosoisuudesta ja siitä miten tuulen nopeus muuttuu korkeuden mukana, kuten kuvatut rakennukset. (Savijärvi & Vihma 2001.)

Turbulenssin intensiteettiä kuvataan tietyn mittausajan (10...30 minuuttia) hetkellisten (0,01...3 sekuntia) tuulennopeusarvojen hajonnan (σ) suhteena kyseessä olevan mittausajan tuulennopeuden keskiarvoon (V). Neutraalissa säätilanteessa turbulenssin intensiteetti korkeudella z voidaan kuvata yhtälöllä

$$I = \sigma / V = \frac{ck}{\ln(z/z_0)}$$

jossa $c \sim 2,2$, $k \sim 0,4$ ja z_0 on maaston aerodynaaminen rosoisuusparametri (m). Jos z_0 on sama laajalla alueella, turbulenssin intensiteetti siis pienenee korkeuden kasvaessa. Alustan rosoisuusparametri Z_0 (m) on merellä luokkaa

0,1...1 m ja metsäalueilla 0,5...1 m. Z_0 vaikuttaa aina logaritminsa kautta. (Tuuliatlas 2009.)

Turbulenssien mittaaminen ja yleisten mittaustulosten saanti on käytännössä haasteellista. Tavallisilla sääasemilla, joista esimerkiksi Ilmatieteen laitoksen tuulitiedot säätietoihin kerätään, tuulimittarin (kuppianemometri) hitaudesta johtuen lyhyin merkitsevä mittausrvo edustaa vain 1...3 sekunnin tuulennopeutta (2-D). Kalliimmissa akustisissa tuulimittareissa ei ole samanlaista hitautta, joten niissä mittaukset tehdään 1...20 Hz taajuudella. Jotta kohteessa tapahtuvaa turbulenssia voidaan tarkentaa, on paikallisia tuulimittauksia mahdollista suorittaa kyseiseen tekniikkaan perustuvalla nopeavasteisella 3-D anemometrillä. Nämä tosin eivät ole sääpalvelun operatiivisessa käytössä, vaan lähinnä tutkimusprojekteissa (kuva 5).



Kuva 5. Nopeavasteinen akustinen 3-D anemometri. (Helsingin Yliopisto.)

Pientuulisovelluksissa paikassa esiintyvää tuulella on erityinen merkitys saatavalle tuotolle. Erityisiä haasteita tuo kaupunkiympäristö, jossa suojaiset ja turbulenttiset esteet luovat efektejä, kompleksisia tilanteita, joita on vaikea

mallintaa ja ennustaa. Valmiit tuulikartat eivät näitä alle 30 metrin ilmiöitä edusta lankaan. (World Wind Energy Association 2012.)

Tuulen mittaus- ja ennustustyökaluohjelmat ovat yleisesti suunniteltu suurtuulisovelluksiin, ja ovat siten myös suhteellisesti kalliita. Ilmatieteen laitos tuulimittausten merkittävänä toimijana ei esimerkiksi koe olevansa riittävän kustannustehokas pientuulimittauksiin (Latikka 2013). Tarvetta halvemmille menetelmille markkinoilla kuitenkin olisi, koska nyt mittaukset jäävät hyvin usein hankkeen kehittäjälle.

3.3 Tuulen esiintyminen – Tuuliatlas

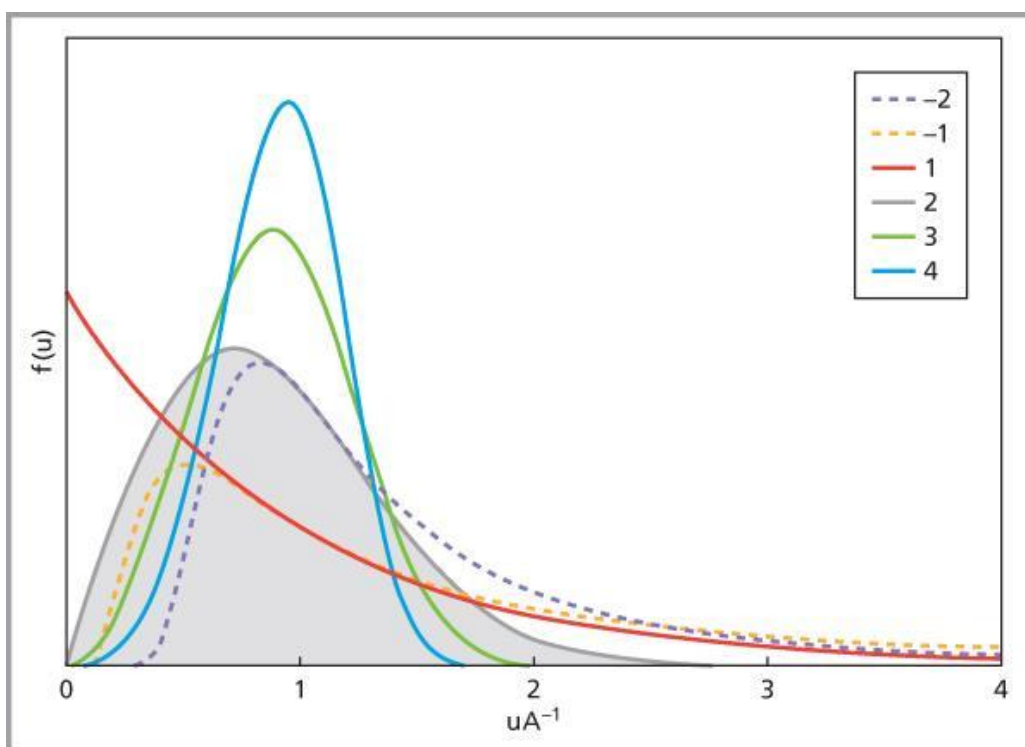
Maan laajuisesti Suomen tuulienergiatiedot on viranomaistaholta kerätty valmiiksi Internet-pohjaiseksi palveluksi, *Suomen Tuuliatlas*, jota ylläpitää *Ilmatieteen laitos*. Tuuliatlasta käytetään yleisesti suurten tuulivoimalaitosten sijoituksia ja kaavoitusta laadittaessa. Tuuliatlaksessa on eri säämalleilla (HIRLAM, AROME) tarkasteltu Suomen tuuliolosuhteita 50 metristä 400 metrin korkeuteen asti, joille Tuuliatlaksen tietokannasta löytyy yksityiskohtaisempaa tietoa tuulen paikallisista ominaisuuksista. Data on kerätty mittauksilla (tuulimittaustornit) ja täydennetty tietokonemallinnuksella (data-assimilaatio). Tietokannan keskeisimmät tulokset löytyvät valmiiksi laskettuina staattisina karttoina ja karttatyökalun antamina arvoina paikkakunnittain (hilapisteittäin), joita voi selata sisällytetyn yksinkertaisen julkisen internet-käyttöliittymän avulla. Staattisina karttoina ovat tuulen keskinopeus sekä tuulivoimaloille lasketut tuottokartat (1 ja 3 MW suurvoimalat), joita voi selata eri aikajaksoina ja eri korkeuksilla. (Tuuliatlas 2009.)

Tuulen keskinopeuskartoissa on esitetty 2,5 x 2,5 neliökilometrin tarkkuudella laskettu keskinopeus (m/s) kullekin kuukaudelle ja vuodelle 0,5 m/s resoluutiolla. Tuulivoimalan tuotantokartat kuvaavat säämallilla tuotetun tuulen nopeuden jakaumasta kolmella erikorkeudella (50m, 100m ja 200m) lapasäätoisen 3 MW tuulivoimalan tehokäyrällä lasketun energiatuotannon

kuukausittaista ja vuotuista keskimääräistä jakaumaa, voimalan muiden tekijöiden ollessa vakioita (standardi ilmakehä). (Tuuliatlas 2009.)

Mitatuista tuulennopeuksista muodostetaan tasavälinen *histogrammi*, joka kertoo kuinka usein tietty tuulen nopeus esiintyy. Tuuliatlaksessa tuulienenergiasovellutuksia varten tuulen nopeuden jakaumaa (nopeusluokkien frekvenssijakaumaa) kuvataan tilastollisella *Weibull*-jakaumalla. Tuuliatlaksen taulukkotiedoissa kussakin hilapisteessä tuulen nopeuden keskiarvon lisäksi on annettu jakaumaa kuvaavat Weibull-parametrit A ja k suuntasektoreittain, jotka muuttuvat Tuuliatlaksessa käytettävän WAsP ohjelmiston avulla korkeuden, maaston rosoisuuden ja topografian mukaan. (Tuuliatlas 2009.)

A on niin sanottu skaalaparametri ja se osoittaa tuulen keskinopeuden sijainnin jakaumassa. Muotoparametri k kuvaa jakauman kallistumaa oikealle tai vasemmalle. Suuremmilla k :n arvoilla jakauman muoto on lähellä normaalijakaumaa (kuva 6).



Kuva 6. Weibull-jakauman muoto eräillä k :n arvoilla. (Tuuliatlas 2009)

Mitä pienempi k :n arvo on, sitä enemmän käyrä on kallistunut vasemmalle. Käytännössä tämä tarkoittaa, että mitä vähemmän tuulen edessä on esteitä, sitä pienempää on tuulen nopeuden hajonta ja sitä kapeampi on jakauma sekä sitä suurempi on k :n arvo. Tyypillisesti sisämaassa käytetään arvoa $k = 2$, rannikolla $k = 3$ ja saaristossa $k = 4$. Tuuliatlaksen A ja k -parametrit on laskettu tuulen keskinopeuden ja tuulen nopeuden keskihajonnan perusteella. Tuulen keskinopeus on $\sim 0,9 \times A$, ja tyypillinen k on ~ 2 Suomessa. (Tuuliatlas 2009.)

Tuulivoimalan vuotuinen energiantuotto lasketaan tavallisesti voimalan tuottokäyrää ja voimalan sijoituspaikan Weibull-jakaumaa hyödyntäen. Suomen oloissa tuulen nopeuden tyypillisellä frekvenssijakaumalla $k \sim 2$. A puolestaan on noin 10 - 15 % suurempi kuin nopeusjakaumasta laskettu tuulen keskinopeus. (Tuuliatlas 2009.)

WasP tietokonemallinnuksessa on käytetty Suomen Ympäristökeskuksen koko Suomea kattavan maankäytön paikkatietokannan CORINE maastotyyppien vastaavia z_0 :n arvoja. Tämä rasterimuotoinen paikkatietoaineisto antaa maankäyttötiedot 25×25 neliömetrin pinta-alan tarkkuudella, jossa tuuliatlaksessa näiden maankäyttökarttojen eri maaperäluokituksille on kullekin määritetty oma aerodynaaminen rosoisuus. Rosoisuuden määritykset on tehty alan kirjallisuuteen ja Ilmatieteen laitoksella mastoissa tehtyihin tuulimittauksiin pohjautuen. (Tuuliatlas 2009.)

Kun tuulivoimalan sijoituspaikka on rannikolla, turbulenssin intensiteetti riippuu huomattavasti tuulen suunnasta. Mereltä (pieni z_0) tulevan tuulen turbulenssin intensiteetti on huomattavasti pienempi (suuruusluokkaa 0,1) kuin mantereelta korkean metsän (suuri z_0) yli tulevassa tuulella (suuruusluokkaa 0,2...0,4). (Tuuliatlas 2009.)

Jos oletetaan, että kaikilla kolmella turbulenttisilla tuulikomponenteilla (vertikaaliset, pitkittäiset ja poikittaiset) on sama intensiteetti (eli samat θ/V), mikä on karkea approksimaatio, turbulenssin intensiteetti ja turbulenssin kineettinen energia (TKE) ovat määritelmiensä mukaisesti seuraavassa yhteydessä toisiinsa:

$$I = \frac{\sqrt{2TKE/3}}{V}$$

Tuuliatlaksen käyttämä AROME sääennustemalli laskee turbulenssin kineettisen energian, ja Tuuliatlaksen dynaamisten karttojen yhteydessä olevissa taulukoissa esitetty turbulenssin intensiteetti perustuu juuri tähän yhtälöön. (Tuuliatlas 2009.)

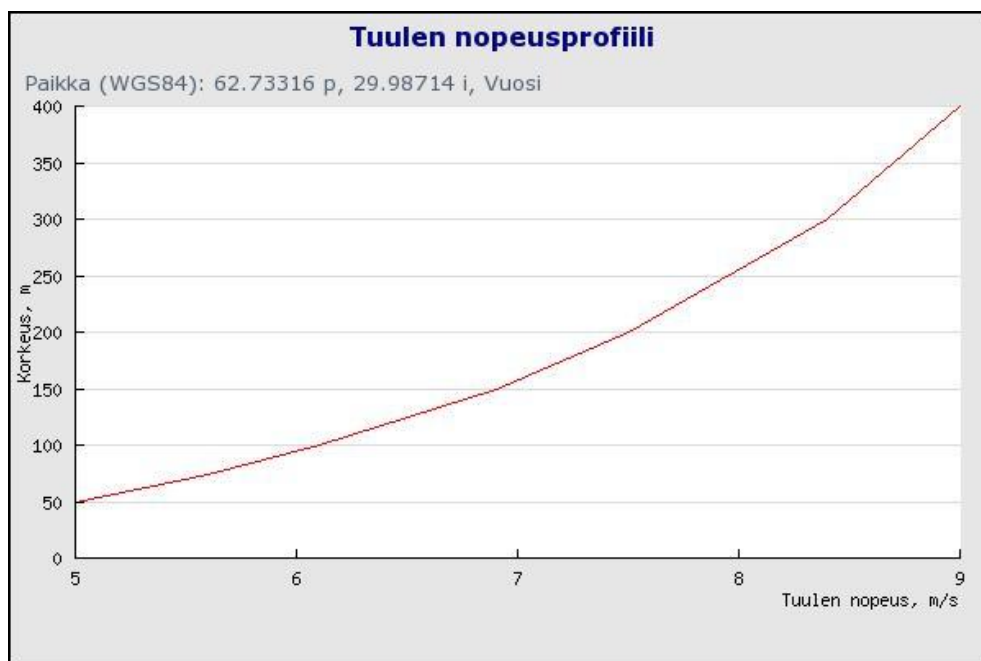
Maksimituuli tarkoittaa tuulen nopeuden 3 sekunnin keskiarvojen maksimia ajanjaksolla, jolta keskituuli on mitattu. Tällaiset lyhytaikaiset tuulenpuuskat syntyvät ennen kaikkea siksi, että ilman pyörteisen sekoittumisen vaikutuksesta ylemmistä ilmakerroksista siirtyy nopeammin virtaavaa ilmaa hetkellisesti lähemmäs maanpintaa. Siksi puuskakerroin tyypillisesti pienenee korkeuden kasvaessa. (Tuuliatlas 2009.)

Puuskakerroin on suuri silloin, kun turbulenttinen sekoittuminen on tehokasta, eli kun maasto on aerodynaamisesti hyvin rosoista (esimerkiksi metsässä ja kaupungissa) ja ilman lämpötila laskee voimakkaasti paksussa kerroksessa ylöspäin mentäessä. (Tuuliatlas 2009.)

Säänennustusmalleista ei suoraan saada puuskakertoimen arvoja. Tuuliatlaksessa annettu puuskakerroin eri korkeuksilla laskettiin käyttämällä hyväksi säänennustusmallista kussakin hilaruudussa saatuja tuloksia ilman pyörteisen sekoittumisen tehokkuudesta (turbulenssin kineettinen energia), tuulen nopeuden pystyprofiilista ja pystysuuntaista sekoittumista rajoittavasta lämpötilan jakaumasta. (Tuuliatlas 2009.)

On tosin huomattava, että Weibull-jakauma ei täsmällisesti vastaa mittaustuloksista saatavaa nopeusjakamaa, vaikka havaintojen lukumäärä olisi suurikin. Tämän johdosta todellisesta havaintosarjasta laskettu tuulen energiatiheys (W/m^2) ja Tuuliatlaksessa tuulivoimalalle laskettu tuotto (MWh) voivat poiketa huomattavasti aiheena olevaan mittaussarjaan sovitetusta Weibull-jakaumasta. Vastaavuuteen vaikuttaa muun muassa tuulenmittauspaikan ympäristö ja mittauskorkeus. (Tuuliatlas 2009.)

Toisaalta Tuuliatlaksen soveltuvuutta pientuulen hyödyntämisessä lähellä maanpintaa (< 50m) ei ole merkittävästi tutkittu. Paikkakuntaakohtaisesti Tuuliatlaksesta saadaan lähinnä yleinen käsitys valitsevista tuuliolosuhteista, mitä puolestaan voidaan estimoida logaritmisesti edelleen maanpinnan tasolle. (Kuva 7.) Tarkempi tuulienergian anto joudutaan todentamaan mittauksilla, joiden määrittelyssä edellä käsitellyt paikalliset vaikuttavat tekijät tulee huomioida.



Kuva 7. Vertikaalinen tuuliprofiili Jakokoskella. (Tuuliatlas 2009.)

Tuulimittausten tarkoituksena on hankkia riittävästi tietoa voimalan sijoituspaikan tuulioloista teknisen suunnittelun lähtöarvoiksi. Ensisijaisesti selvitetään tuulennopeuksien jakauma ja suunta. Tuulimittaukset tulisi tehdä tulevan voimalan sijoituspaikalla ja ajatellulla napakorkeudelta. Mittausten olisi kestettävä läpi vuoden vaihteluiden rekisteröimiseksi aikasarjaan.

Pienvoimaloiden tuulimittauksiksi riittää yleensä roottorin napakorkeudelta mitatut keskituulennopeus 10 minuutin mittausjaksolla ja tuulen suunta, mikä ei niin merkityksellinen vaaka-akselisen voimalan kohdalla. Suurissa voimaloissa mitataan edellisten lisäksi myös turbulenssiaste ja tuulen vertikaalinen

nopeusjakauma josta saadaan määritetyksi tuuligradientti. Tämä ei kuitenkaan ole merkityksellistä pienvoimaloiden rakenteen pienuuden takia.

3.4 Tuulienergian teho

Ilmakehän virtauksen, eli havaittavan tuulen, kineettisen energian (E_k) hyödyntämiseksi energialähteenä on sitä tarkasteltava virtaavan ilmamassan hetkellisenä yhteen pisteeseen vaikuttavana tehona (P).

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (1)$$

Josta virtaavan ilmamassan hetkellinen (dm/dt) pinta-alalle (A) kohdistama teho saadaan ($dm/dt = \rho \cdot A \cdot v$):

$$P = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot v^3 \quad (2)$$

Missä:

- ρ on ilman tiheys (normaaliolosuhteissa $1,225 \text{ kg/m}^3$; 15 C° ; merenpinnantasolla)
- v kyseiseen pintaan vaikuttava tuulen nopeus.

Tuuliturbiiniin aikaansaama teho (P_u) saadaan edellisen mukaisesti siten:

$$P_u = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot A \cdot \rho \cdot v^3 \quad (3)$$

Yhtälössä vakio C_p on tuuliturbiinikohtainen hyötysuhde, ns. tehokerroin, joka on aina < 0.59 . (Twidell & Weir 2006, 263.)

Tuuliturbiinin tehoyhtälön (3) tekijöistä voidaan huomioida

- hyötysuhteella kuvataan kuinka paljon turbiinin läpi virtaamasta ilmamassasta lopulta muuttuu mekaaniseksi energiaksi turbiinin akselille; ilmavirtaushan ei pysähdy kokonaan turbiiniin, vaan heikkenee siinä hyötysuhteen mukaisesti voimistuen samassa suunnassa myöhemmin uudelleen
- pinta-ala on rakenteellinen tekijä, jota lisäämällä voidaan tehoa ja energian saantia lisätä turbiinissa
- ilmantiheydellä on merkitystä tehontuotannossa, jos se vaihtelee merkittävästi; sijoituspaikan korkeudella (vuoristo) ja vallitsevalla lämpötilalla (kuumat alueet) vaihtelu voi olla kymmenien prosenttien luokkaa kaasujen tilayhtälön mukaisesti
- tuulen nopeudella on kuutiollisen luonteensa takia merkittävin vaikutus tehon tuottoon, mikä korostaa sijoituspaikan merkitystä tuulienergian tuotannolle.

Tuuliturbiinin siiven kohdistuva aksiaalinen virtaus kehittää siiven pinnassa kohtisuoran noston, sekä toisaalta siipeen kohdistuvan paineen, jotka aikaansaavat turbiinin akselia pyörittävän väännön. Kyseisen väännön ja sen kulmanopeuden mukainen ideaaliteho on sama, kuin tuulen antama teho yhtälössä (1).

Saksalainen Albert Bentz todensi jo v.1928, että turbiinin otettaessa talteen tuulen energiaa kohdallaan (alalla **A**) tuulen nopeus samalla hidastuu, mutta tuuli ei pysähdy kokonaan ja siten mekaanisesti tuotettava teho voi maksimaalisesti olla vain 59,3 % (maksimaalinen tehokerroin **C_p**). Juuri tämä tehokertoimen hyvyys riippuu siipien aerodynamiikasta ja turbiinin muista teknisistä rakenteellisista ratkaisuista. Yleisimmin tekniset ratkaisut tarkoittavat turbiinin pidempiä roottoreita ja isompaa rakennetta.

Tuulienergiaa tarkastellessa on muistettava, että yllä esitetty tuulen teho (**Pu**) on hetkellisarvo, joka tyypillisesti vaihtelee suurestikin tuulisuudesta riippuen. Siten tuulienergian tuottoa tarkastellaankin yleisesti energiayksikkönä (teho/aika), kilowattituntina (kW). Tuulisuutta ilmaistaan tässä yhteydessä aina 10 minuutin keskiarvona.

Tuulivoimalan vuotuinen energiatuotto saadaan helpoiten käyttämällä valmiita tuulimittausdatan analysointiohjelmistoja. Useimmissa ohjelmissa ylläpitäjä antaa laskennassa tarvittavat tuulivoimaloiden tehokäyrät ja muut arvot. Esimerkiksi Suomen Tuuliatlas käyttää alalla tunnetulla tanskalaista WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program) ohjelmaa, jolla voidaan analysoida Tuuliatlaksesta saatavaa tuulidataa ja laskea tuulivoimaloiden tuottoja.

Pitkäaikaisista tuulen nopeusmittauksista muodostettua Weibull-jakaumaa ja tuulivoimalan tunnettua tehokäyrrä hyväksikäyttäen voidaan myös taulukkolaskentaohjelmalla laskea voimalasta saatava vuosienenergia. Taulukkoon lasketaan voimalan vuotuinen energiantuotto kutakin tuulennopeutta vastaavan antotehon ja tuulen vuotuisen vallinta-ajan tulona. Voimalan vuotuinen energiantuotto saadaan, kun taulukkoon lasketut osaenergiat summataan.

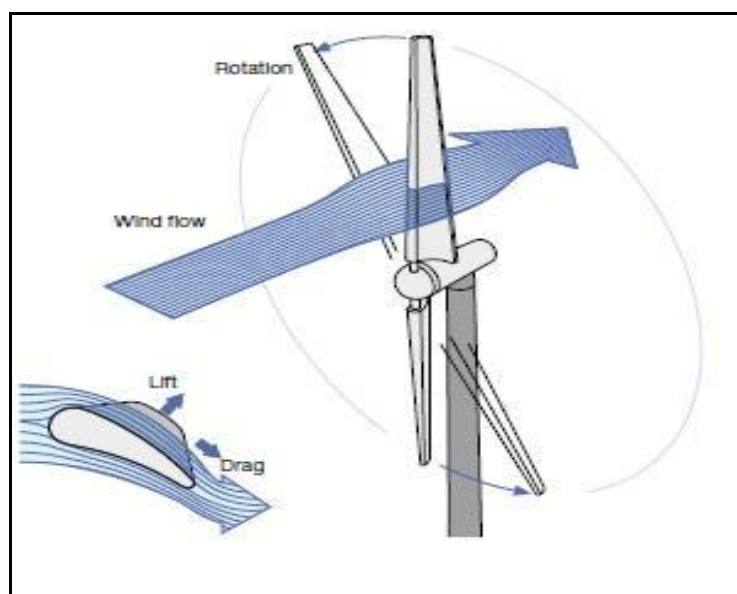
4. Tuuliturbiiniteknologia

4.1 Jako toimintaperiaatteen mukaan

Tuuliturbiinien jako isoihin ja pienempiin sovelluksiin kaiken kaikkiaan on hyvin kirjavaa. Oleellisin eroavaisuus tuuliturbiineissa on asentoon, millä tuuli kohdataan, liittyvä luokittelu. Turbiinit on luokiteltu joko vaaka- tai pysty(akseli)roottorimalleiksi

- Vaaka-akselituuliturbiini, Horizontal Axis Wind Turbines – HAWT
- Pystyakselituuliturbiini, Vertical Axis Wind Turbines – VAWT

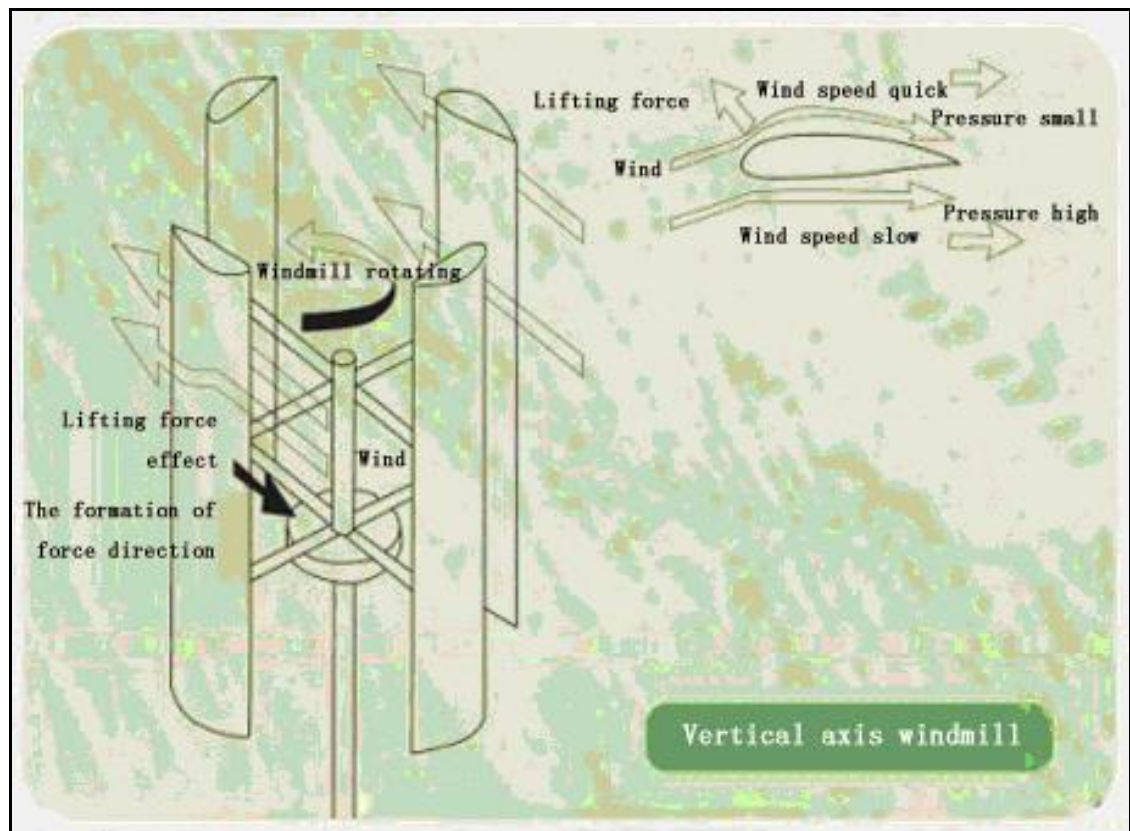
Toinen turbiineihin liittyvä jako löytyy niiden aerodynaamisen toimintaperiaatteen mukaisesti “noste” (lift) ja “virtausvastus” (drag) tyyppisiin laitteisiin. Noste (lift) tyyppisessä laitteessa tuuli virtaa turbiinin siiven molemmin puolin aiheuttaen niiden erilaisen profiilin takia aerodynaamisen nosteen (tyhjiötä yläpuolelle ja painetta alapuolelle), joka on kohtisuoraan virtausta vastaan (kuva 8). (ABB 2011.)



Kuva 8. HAWT toiminta. (ABB 2011.)

Voima on sitä suurempi, mitä nopeammin ilma virtaa siiven ohitse. Siipi toimii lentokoneen siiven tai veneen purjeen tavoin. Tuuliturbiinissa tämä noste muutetaan rakenteen avulla pyöriväksi liikkeeksi. Usein siiven oma pyörimisliike lisää vielä suhteellista nopeutta ilmapirtaan nähden. Tällaiset turbiinit pyörivät usein paljon suuremmalla kehänopeudella kuin vapaan ilman nopeus. (ABB 2011.)

Tuulen virtaus turbiinin läpi synnyttää myös vastustavan voiman (drag) siiven rakenteissa, joka toisaalta heikentää nostovaikutusta. Siten siiven aerodynaaminen "lift-drag"-suhde tulee olla korkein mahdollinen turbiinin asetellussa toimintapisteessä, joka on eräs suurten HAWT-tyyppisten suurvoimaloiden suunnittelun haasteista. Kuvassa 9 läpivirtaustapahtumaa on havainnollistettu pystyakselimallin (VAWT) turbiinissa.



Kuva 9. VAWT toiminta. (Liftwind 2012.)

Tuuliturbiinien oleellisia eroavaisuuksia yllä mainitun HAWT/VAWT-jaon mukaan on lueteltu seuraavassa. (ABB 2011.)

HAWT:

- käynnistävä tuuli tultava edestä/takaa (up/down-wind)
- tuulensuuntaa seurattava (ohjaus), viive energiantuottamisessa
- korkeampi käynnistysnopeus
- turbulenssi rajoittaa hyötysuhdetta virtauksen häiriintyessä
- rakenne kompleksinen (masto), aiheuttaa värinöitä ja melua
- ei sovi taajamiin vaadittavan korkean rakenteen takia.

VAWT:

- toimii tuulella kaikista ilmansuunnista (360°)
- käynnistyy jo pienestä tuulesta
- turbulenssi ei häiritse merkittävästi, matala asennuskorkeus
- ei tarvitse myrskysuojausta
- tehokkaampi tuotto laajemman toiminta-alueen (tuuli) vuoksi
- yksinkertaisuus (vaihteisto/generaattori perustuksessa)
- ympäristöystävällinen/-turvallinen (esim. linnut/lepakot)
- äänettömämpi, soveltuu myös taajama asennuksiin (katoille).

Tuulienergian teollisessa tuotannossa yleistyneet suuret HAWT-tuuliturbiinit vaativat pitkien siipien takia aina korkeamman mastorakenteen, joka ei ilman viranomaiskäytäntöjä ole luvallista rakentaa (kaavoitus). Kyseiset voimalat aiheuttavat siten myös muita ympäristön kannalta arvuutettavia tekijöitä (melu, maisema tekijät, tutkahäirintä, tiestö, voimalinjat), joihin tulee soveltaa ympäristövaikutusten arviointimenettelystä annetun lain mukaista arviointimenettelyprosessia, kuten suurissa tuulivoimapuistohankkeissa.

Pientuotannossa HAWT-tuuliturbiineita on käytössä globaalisti. Niiden osuus pienturbiinien asennuskannasta verrattuna VAWT-malleihin onkin lähes 90 %. Haittana niillä kuitenkin on rakenteellisesti tarvittava maston korkeus, joka helposti ylittää 15 metriäkin, kohdaten täten samoja rajoituksia kuin teolliset HAWT turbiinit. (WWEA 2012.)

Varhaisimmat tuulimyllyt ovat ehkä olleetkin juuri yllämainituista syistä pysty- eli vertikaalituuliturbiinimalleja (VAWT), soveltuen veden pumppaukseen ja viljan jauhamiseen. Tosin nykyisin nämä eivät ole kovinkaan yleisiä, johtuen lähinnä rajallisesta tehon tuotosta. Pystyakselimallit soveltuvat kuitenkin parhaiten tässä yhteydessä tarkasteltavaan rajattuun sovellukseen pientuotannossa, jossa niiden ympäristövaikutteet ovat huomattavasti lievemmat. Täten opinnäytetyössä keskitytäänkin juuri sopivien VAWT-mallisten ratkaisujen löytämiseen.

Tuuliturbiinin toiminta-alue, koskien kaikkia eri rakenteita, määräytyy tuulen nopeuden mukaan toimintapisteittäin seuraavasti:

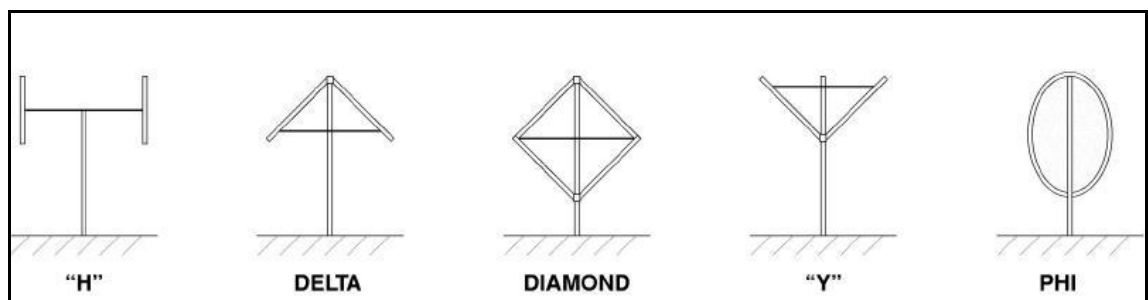
- käynnistys nopeus (Start-up speed) – turbiiniin roottori alkaa pyöriä
- tuotannon aloitus nopeus (Cut-in speed) – turbiini aktivoituu ja alkaa tuottaa energiaa; generaattorin jännite on kasvanut riittävästi havaittavaa kuormaa vasten
- nominaalinen toimintanopeus (Rated speed) – Turbiinin suunniteltu normaali toimintanopeus (tuulen nopeus, turbiinin kierrosnopeus), jolloin se tuottaa nimellisen (sähkö)tehon
- irrotusnopeus (Cut-off speed) – turbiinin pysäytysnopeus toiminnallisen vahingoittumisen välttämiseksi; roottori/generaattori pysäytettävä mekaanisesti (jarrutus)
- maksimi nopeus (Max speed) – turbiinin rakenteellinen nopeus, missä se vielä kestää ympäröivän tuulen voiman pysäytettynä särkymättömänä (turvallisuusnäkökulma).

(ABB 2011.)

4.2 Pystyakseliturbiinit

Vaikka historiallisesti perusratkaisut VAWT tyyppin turbiineille on esitelty jo aiemmin, niiden kehitys kiihtyi varsinaisesti -70 luvun alkupuolella ensimmäisen öljykriisin seurauksena USA:ssa ja Kanadassa (Darrieus "Egg-beater" ja "phi")

mallit), sekä Euroopassa Ruotsissa ja Britanniassa (H-VAWT-malli). Kokeiltujen roottoreiden eri mallien esimerkkejä on esitetty kuvassa 10. Myöhemmin osa näistä on jäänyt taka-alalle HAWT-tyyppisten ratkaisujen kehittyessä ja kaupallistuessa myös pientuulivoimaloissa, mutta viime vuosien aikana kiinnostus on jälleen lisääntynyt, varsinkin Kaukoidässä. Tutkimusta pysty akselituuliturbiineista tehdään nykyisin Britanniassa, Japanissa, Kanadassa, Kiinassa, Saksassa ja Taiwanilla. (Gipe 2009, 1-37.)



Kuva 10. Erilaisia roottoriratkaisuja (Gipe 2009, 2).

Yleisimmät kaupallistuneet VAWT rakenteet ovat

- Savonius (S.J. Savonius, Suomi, v.1924)
- Darrieus (Georges Jean Marie Darrieus, Ranska, v.1927)
- Darrieus H-roottorimalli (H-VAWT), tunnetaan myös nimellä Giromill
- Darrieus/Savonius hybridi-rakenteet
- sekä näiden muunnelmia (Vortec diffuusori).

Lisää mitä mielikuvituksellisimmista tuuliturbiinirakenteista on löydettävissä internetistä (Khammas 2007).

4.3 Savonius-turbiini

Savonius-turbiini on suomalaisen Savoniuksen 1930-luvulla kehittämä ja patentoima pysty akselinen tuuliturbiini, jolla on kohtuullinen hyötysuhde ja vääntömomentti alhaisilla kierroksilla. Se on riippumaton tuulen suunnan vaihtumisesta, mutta käynnistys- ja pyöritysmomentti riippuvat turbiinin

asennosta tuulen suhteen ja käynti nykyi kierroksen aikana sillä siiven eri asennoissa pyöritysmomentti vaihtelee. (Wikipedia 2013.)

Savonius-turbiini (roottori) koostuu kahdesta (tai neljästä) puoliympyrän muotoon taivutetusta pystylevystä, ilman ilmanohjaimesta, jotka avautuvat eri suuntiin (90 asteen kulmassa) tarkoituksenaan vastustaa mahdollisimman tehokkaasti tuulta pyörimiskehän toisella sivulla palaten alkuasentoon tuulen yläpuolelle mahdollisimman vähän vastusta aiheuttaen. Toisissa malleissa pinnat ovat muotoiltu vielä kiertäen spiraalin muotoon ilman ohjautuvuuden takia (alavirtaus, downwind), joista merkittävin lienee suomalainen Windside-roottori.

Savonius-turbiini on toiminnaltaan ”virtausvastus” (drag) turbiini, koska pyörivän liikkeen momentin saa aikaiseksi sen ilman ohjaimissa eriävä kitka, vastus (drag), tuulen virtauksessa turbiinin läpi. Turbiinin siipeen kohdistuva voima perustuu siiven vastukseen tuulen ohittaessa sen myötätuuleen. Turbiinin siiven vastuskerroin on suuri silloin, kun siipi kulkee myötätuuleen ja pieni siiven palatessa vastatuuleen. Tuuli kohtaa turbiinin pinnan jyrkässä kulmassa ja synnyttää voiman, joka on sitä suurempi mitä isompi nopeusero turbiinin pinnan ja tuulen välillä vallitsee. Tästä johtuu, että turbiinin pyörimisliikkeen kehänopeus jää aina pienemmäksi kuin tuulen nopeus, sillä tuulen nopeutta vastaavalla kehänopeudella ei enää synny turbiinia käyttävää voimaa ja pyöritysmomenttia. Turbiinin palaava, tuulta vasten pyörivä siipi puolestaan aiheuttaa vastusta, joka johtuu suuresta suhteellisesta ilmanopeudesta vaikka vastuskerroin olisikin pieni. Ihannetapauksessa palaavan siipielementin vastus olisi nolla ja tuulen mukana kulkevan taas mahdollisimman suuri. (Wikipedia 2013.)

Tämän tyyppin turbiinit pyörivät pienellä nopeudella sekä ovat teholtaan hyvin heikkoja. Savonius turbiinin etuna on yksinkertainen rakenne ja hyvin alhainen käynnistysnopeus. Parhaimmillaan Savonius on siellä, missä tarvitaan kohtuullisen pientä tehoa ja pyörimisnopeutta (kuten akkujen lataus).

Huonoja puolia Savonius-turbiinilla ovat roottorin asennosta riippuva käynnistysmomentti ja epätasainen pyörimisliike. Pyörimisen epätasaisuutta voidaan vähentää asentamalla kaksi roottoria päällekkäin 90° kulmaan toisiinsa nähden (neljä roottoria). Pyöriessään rakenne aiheuttaa voimakkaita poikittaisvoimia, jotka rasittavat tukirakenteita ja laakereita, joten kovin suuritehoisia laitoksia tällä periaatteella ei voi rakentaa. (ABB 2011.)

Savonius-turbiinin suojaus myrskytilanteessa on tärkeää sillä turbiinin suuri pinta-ala aiheuttaa varsin suuria kuormituksia. Kovilla myrskyillä rakenteen kestävyys voi olla uhattuna sillä epätasainen kuormitus aiheuttaa rakenteeseen värähtelyjä sekä väsytystä. Tuulen nopeuden kasvaessa turbiinin tehokerroin pienenee ja loiventaa vääntömomentin kasvua, mikä vähentää generaattorin ylikuormittumisvaaraa.



Kuva 11. Savonius turbiineja. (ABB 2011 & Folkecenter 2013.)

Savonius-turbiinin pääominaisuuksia ovat

- ”hidas” turbiini
- sopiva alhaisille tuulille rajoittuneella alueella
- tarve nopeuden säätöön, jotta pysytään hyötysuhteen toiminta alueella
- ei mahdollisuutta aerodynaamiseen jarrutukseen kiinteän rakenteen takia
- tarvitaan mekaaninen jarru

- tarvitsee lujan rakenteen ylimenoalueen puuskia varten (suhteellinen suuri pinta-ala)
- matala ääni
- alhainen hyötysuhde
- sopii lähinnä vain pieniin teholuokkiin.

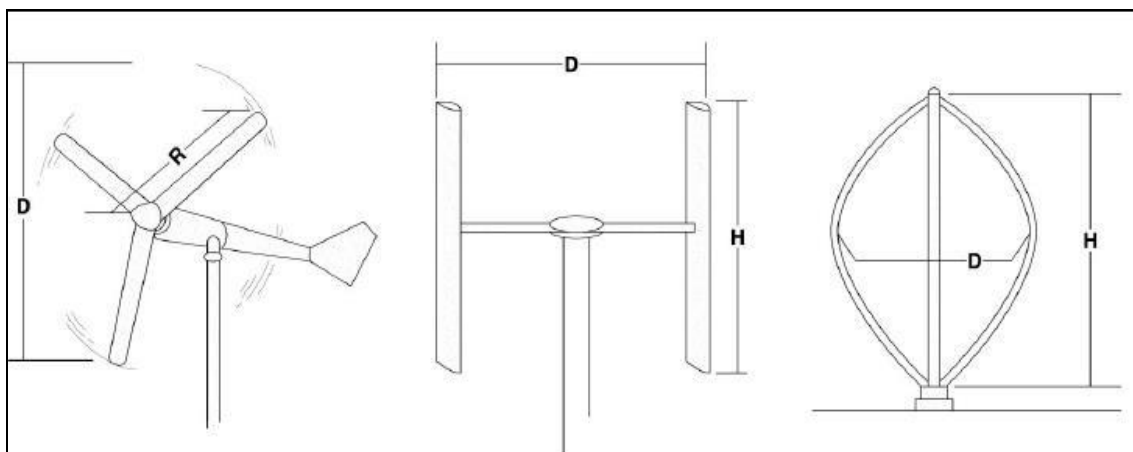
Savonius-turbiinin hyötysuhteen ylärajana pidetään yleisesti noin 18 prosenttia. Suppenevilla ja avartavilla tuulenohjaimilla voidaan tehoa kuitenkin hieman nostaa, parhaimmillaan aina 23 % hyötysuhteeseen asti. (Wikipedia 2013.)

Windside-turbiini "Tuuliruuvi" on Savonius-turbiinin kehitelmä, jossa on poistettu käynnistysmomentin riippuvuus tuulen suunnasta ja käynnin epätasaisuuteen liittyneet ongelmat kiertämällä turbiinia ruuvin tavoin. Turbiini on suomalaisen Windside Oy:n patentoima (liite2).

Myrskytilanteessa Windside-turbiini rasittuu vähemmän kuin normaali Savonius-turbiini, koska siihen ei kohdistu niinkään värähtelyjä aiheuttavia sysäyksiä. Lisäksi rakenne kestää muotonsa ansiosta suuriakin kuormituksia.

4.4 Darrieus-turbiini

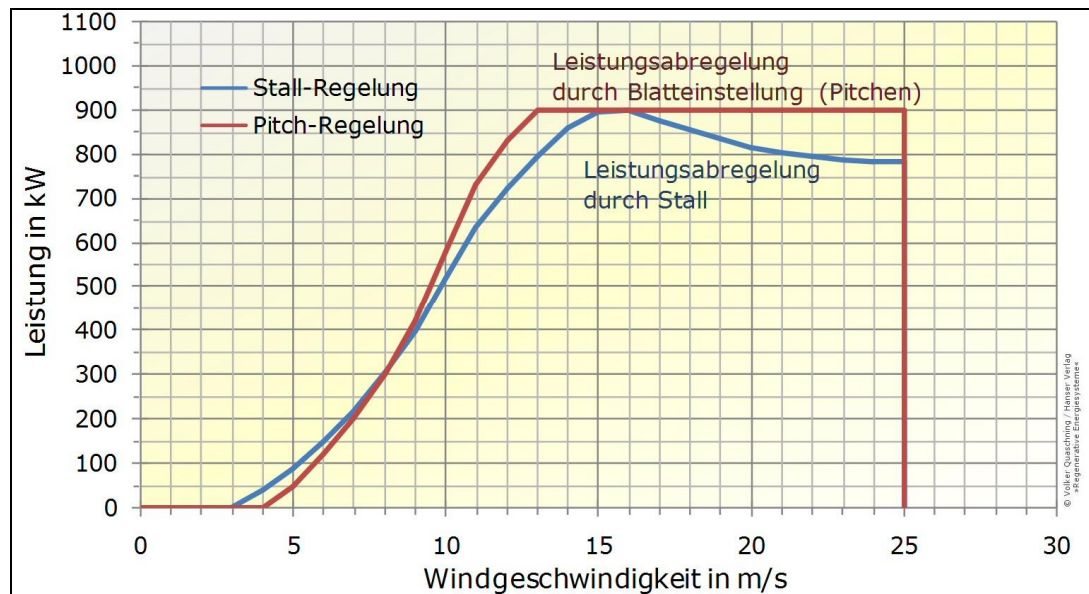
Darrieus-tyypin turbiini on toiminnaltaan "nosto" (lift) tyyppin turbiini, kuten HAWT-turbiinit. Verrattuna "virtausvastus" (drag) tyyppin turbiiniin sillä on suurempi hyötysuhde, koska sen rakenteellinen tuulikitka on pienempi. Toisaalta kaksisiipinen Darrieus-turbiini ei voi käynnistyä itseksensä (kitka on nollasumma) vaan tarvitsee ulkoisen käynnistysmomentin ("Egg-bieter" malli), jonka on tuotettava vähintään kolme kertaa tuulen nopeutta suurempi kehänopeus. Tämän takia nykyisissä kaupallistuneissa suorasiipisissä H-mallin VAWT-turbiineissa (H-VAWT) on tyypillisesti pariton määrä (3, 5, tai 7) siipiä (lapoja). Kuvassa 12 on havainnollistettu tyypillisimmät Darrieus turbiinimallit, sekä dimensiot tuulipinnan laskemiseksi verrattuna HAWT-tyypin turbiiniin. (ABB 2011.)



Kuva 12.. Tuulipinnat, HAWT, H-VAWT ja Darrieus "Egg-bieter". (ABB 2011.)

Darrieus-turbiinin etuna on suuri pyörimisnopeus, joka helpottaa generaattori-vaihteiston rakentamista. Toinen kiistaton etu on se, että koneisto voidaan rakentaa turbiinin akselin alapäähän lähelle maan pintaa. Turbiinilla päästään ihanteellisissa olosuhteissa HAWT-mallia vastaaviin hyötysuhteisiin, tuulialueen laajuuden takia jopa parempaan. Suurimpina ongelmia Darrieus-turbiineilla on ollut mekaaninen kestävyys sillä turbiinin pyörimisen aikana siihen vaikuttavat voimat aiheuttavat erittäin kovan väsytytkuormituksen (Darrieus "Egg-bieter").

Nykyisin Darrieus H-VAWT-mallin siipien asentoja (lapakulmaa) voidaan pyörimisen aikana teknisesti jossain määrin myös säätää (lift/drag suhde). Tähän tarvitaan tuulen nopeuden mittaus turbiinilla. Tämä suojaa myös turbiinin rakennetta kovilla tuulilla, jottei nopeus kasva yli toiminta-alueen (Cut-off speed). Kuvassa 13 on havainnollistettu erään H-VAWT mallin tehokäyrää (tuulen nopeus / turbiinin teho) ja sen tehoalueen laajennettavuutta, sekä ohjattavuutta kyseisen säädön avulla (punainen käyrä) verrattuna ilman kyseistä säätöä (sininen käyrä). Apuna pyörimisnopeuden säädössä voidaan käyttää myös generaattorin sähköistä vastamomenttia, jolloin maksimi irrotusnopeus (Cut-off speed) on myös hallinnassa ylisuuria tuulen nopeuksia varten. (Envento 2013.)



Kuva 13. Tehokäyrä. (Envento 2013.)

Koska kyseistä säätöä on tutkittu viimeaikoina ja H-VAWT-turbiinin toiminta-alueella, sekä tehokerrointa (hyötysuhdetta) on pystytty parantamaan säädön avulla, on se lisännyt tämän tyyppin pientuuliturbiinit kaupallista kiinnostavuutta.

Darrieus-mallin yleisiä ominaisuuksia ovat

- ”nopea” turbiini, suuri pyörintänopeus nimellisteholla
- sopiva suurempaan tehon tuottoon (kuin Savonius turbiini)
- toimii myös turbulenteissa tuuliolosuhteissa
- sopiva myös alhaisille tuulille (verrattuna HAWT tyyppiin)
- rajoittunut hyötysuhde verrattuna HAWT tyyppin turbiiniin, koska siipien pinta lähellä akselia hitaassa nopeudessa
- mikäli kiinteät siivet, ei mahdollisuutta aerodynaamiseen jarrutukseen
- tarvitsee nopeussäädön pysyäkseen toiminta-alueella (Cut-off hallinta)
- matala äänitaso, sekä rakenteen värähtely; siten sopiva asennettavaksi rakennusten katoille/rakenteisiin
- tarvitsee jäykän rakenteen kestäämään suuria tuulia
- vaihteiston, sekä generaattorin sijaita maantasolla; alhainen painopiste ja helppo asennus/huollettavuus. (ABB 2011.)

4.5 Hybridiratkaisut

Darrieus-Savonius-hybridimallissa molempien tyyppien aerodynaamiset ratkaisut tulevat esille, ja samalle akselille kytkettynä Darrieus turbiini pystyy käynnistymään itsekseen. Toisaalta rakenteista tulee helposti raskaita, joka on hidastanut tämän tyyppin turbiinien kaupallistumista suuremmille tehoalueille. Sovelluksena on esimerkiksi taajamien ulkopuolella katuvalaistuksessa (Taiwanissa ja Kiinassa). (ABB 2011.)



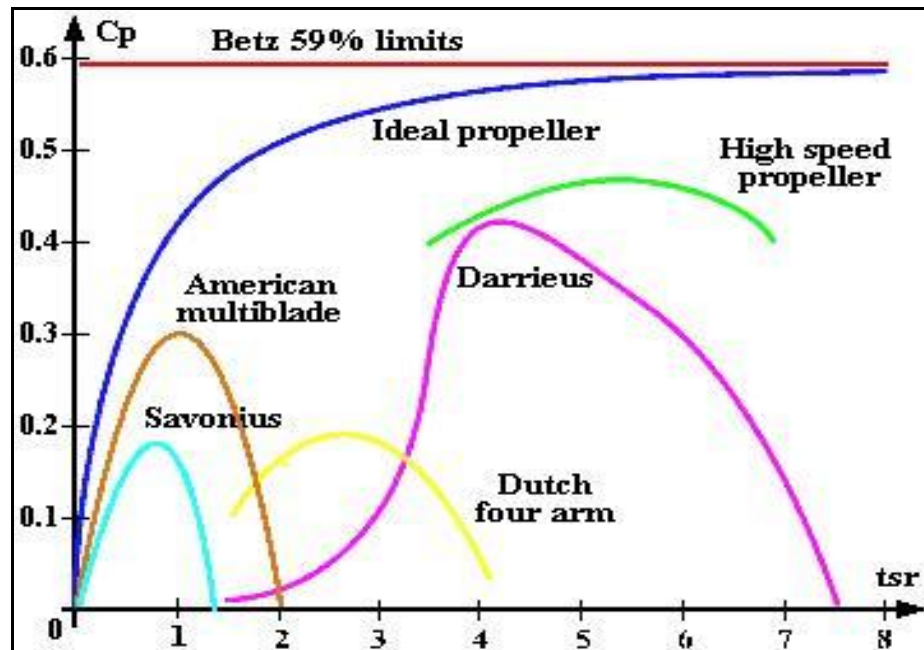
Kuva 14. Hybriditurbiini, Taiwan. (ABB 2011.)

4.6 VAWT-tuuliturbiinien soveltuvuus pientuotannossa

Pienmuotoisessa tuotannossa tuuliturbiinin pitäisi toimia tehokkaasti etenkin heikoissa tuulissa. Mikäli roottoria ei ole mahdollista viedä useiden kymmenien metrien korkeuteen, sähköä on pystyttävä tuottamaan jo alle 5 m/s tuulista. Pysty akseliset roottorit voivat olla tällöin hyvä ratkaisu. Pystyroottorit hyödyntävät tehokkaimmin juuri heikkoja ilmavirtauksia, minkä lisäksi niitä ei tarvitse suunnata tuulen mukaan. Ratkaisut ovat usein myös äänettömpiä ja visuaalisesti vähemmän huomiota herättäviä kuin kolmilapaiset HAWT-roottorit.

Mikäli tuuliturbiineita ajatellaan hyödynnettävän määrällisesti samassa kohteessa, puhutaan niin kutsutuista tuulipuistoista. Tällöin eri turbiinityyppien sovellettavuus eroaa toisistaan merkittävästi. Isot HAWT-tuuliturbiinit tarvitsevat puistomaisesti rakennettuna oman korkeuden mukaan itseään jopa kymmenkertaisen etäisyyden toisiinsa ns. jälkiturbulenssin takia (vortex). Tämä piirre madaltaa kyseisten turbiinien hyötysuhdetta maan käytön suhteen (power density) puistorakenteissa. Tässä suhteessa VAWT-turbiinipuistoratkaisuiden hyötysuhde saattaa olla yli kolminkertainen, koska VAWT-turbiinit voidaan sijoittaa vain noin nelinkertaisen etäisyydelle toisistaan (oma korkeus). Tällöin saadaan vielä hyviä tuloksia tuulen suunnan vaihdellessa ja vuon ollessa myös turbulентinen. Tiheämmin rakennetun puiston jotkut turbiinit voivat vaihteluiden mukaan pyöriä jopa vastakkaisiin suuntiin, eikä tehoa menetetä virtausten pyörteilyn takia. (Dabiri 2011.)

Kuten tuulesta saatavasta tehosta on aiemmin todettu, tuuliturbiinin rakenteellista hyötysuhdetta kuvaa tehokerrointa (C_p). Tehokerroin on tuuliturbiinin tärkein valintakriteeri soveltuvuutta ajatellen tässä yhteydessä erilliskohdetta ajatellen. Eri rakenteiden suuntaa antavia C_p arvoja on koottu kuvassa 15.



Kuva 15. Eri tuuliturbiini rakenteiden C_p arvoja. (ABB 2011)

Kuvan 15 C_p -Betz raja-arvo voidaan saavuttaa vain tietyllä lavan huipun pyörimisnopeuden suhteella tulevan tuulen nopeuteen. Tätä nopeutta kutsutaan kärkinopeussuhteeksi λ (Tip Speed Ratio, TSR), mikä lasketaan yhtälöllä:

$$\lambda = r \omega / v$$

Missä:

ω = pyörimisaajuus [1/s]

r = roottorin säde [m]

v = tuulen nopeus [m/s].

Sekä λ että C_p ovat laaduttomia, joten niillä voidaan kuvata minkä tahansa koko-luokan tuuliturbiinin suorituskäytöä. (ABB 2011.)

Kuten eri rakenteiden C_p arvoista voidaan todeta, on Darrieus-malli ja varsinkin sen H-roottorinen toteutus edellä käsiteltyn lapakulmaa koskevien teknisten parannusten avulla optimaalisin ratkaisu tämän työn aihekehykseen. Kyseisiä kaupallisia markkinoilta saatavia malleja on työssä haettu käyttäen lähteenä maailman tuuliyhdistyksen pientuulivalmistajakatalogia (WWEA Small Wind Manufactures Catalogue).

4.7 H-VAWT-tuuliturbiinien saatavuudesta

Markkinoita tutkittaessa rajauksena on ollut, että turbiinin antama nimellisteho tulisi olla vähintään 4 kW tai turbiinin on muuten oltava teknisesti soveltuva, jotta työssä etsittävät kohteet voisivat saada riittävän energiantuoton. Aiemmin mainitun markkinatutkimuksen haun tuloksena on liitteenä laaditut taulukot, joihin karsiutui 344 valmistajasta 20 soveltuvimman joukko. Seuraavassa on esitetty analyysiä näkökulmasta, miten Suomesta katsoen kyseisten valmistajien tuotteita voisi käytännössä soveltaa.

Kotimainen turbiinivalmistaja (liite 2) ei rajauksen mukaisesti valitettavasti sovi tarkastelun piiriin. Windsiden suurin malli on tarkoitettu projektitoimituksiin, joista liitteessä C esimerkkinä käsiteltävät kattoasennukset.

Kiinasta löytyy koko joukko valmistajia, joiden laatu ja luotettavuuden tarkistamiseksi tarvittaisiin toimiva maahantuoja jonka puoleen kääntyä. Kyseisistä laitteista liitteessä A on malliksi otettu valmistajina Bernoulli, Mailong Energy ja SWAT Inc, joiden mallistoista sopivia laitteita löytyy. Näillä myös kommunikaatio sujuu, ainakin aluksi, verkon yli englannin kielellä. Viime mainittu toimiikin laajemmin kansainvälisillä markkinoilla. Kiinalaisia valmistajia voi hyvinkin pitää teknisenä referenssinä mihin ala on menossa, koska valtaosa vuotuisesti myydyistä VAWT turbiineista valmistetaan ja myydään Kiinassa.

Japanista ja Taiwanilta löytyy myös pienturbiiniteollisuutta, mutta kommunikaation vaikeuden ja referenssien puuttuessa tekee se tuotteiden hyödyntämisen kiinalaisiin verrattuna huomattavasti haastavammaksi.

US/Kanadasta tulevien turbiinien hyödyntäminen on vaikeaa niiden suunnittelun seurattessa paikallisia standardeja sähköisesti kuin mitoituksellisesti, verrattuna muuhun maailmaan jossa yleisesti on käytössä Eurooppalainen IEC standardointi. Täten US/Kanadalaiset valmistajat toimivat lähinnä omalla mantereellaan.

Kiinnostavimmat VAWT-tyyppisten tuulivoimaloiden valmistajat tulevatkin siten Suomen markkinoita ajatellen lähinnä Euroopasta, jossa etenkin Saksasta löytyy useampi varteenotettava valmistaja. Näistä tehdyn rajauksen mukaan soveltuvia valmistajia tuotteineen ovat Gildemeister, Heos-energy, Evento windenergy, Neuhäuser ja WindTec. Myös Belgialainen Fairwind edellisten kaltaisena, sekä eritoten taajama-asennuksiin sopivana mallina quietrevolution (UK) soveltuvat tehtävän rajaukseen (liite 1)

Edellä mainittujen valmistajien H-VAWT-tyyppiset tuulivoimalat ovat ehkä soveltuvampia haja-asutusalue kohteisiin, tarvittavan erillisen mastorakenteen takia (tehoalueen alaraja >4 kW). Tyypillinen napakorkeus niillä on yli 10 m ja laitteiden paino on myös merkittävä (usein yli 1000 kg). Nimellinen tuulen nopeus näillä laitteilla on 12...14 m/s, mikä tuottavuutta ajatellen edustaa jo hyvin tuulista sijoituspaikkaa.

Liitteen A taulukossa tehokerroin C_p on laskennallinen ilmoitetun nimellistehon, tuulen nimellisnopeuden ja tuulipinnan mukaan. Valmistajat ilmoittelevat hyvin rajallisesti hyötysuhteitaan ja laskettujen C_p arvojen valossa voi taulukosta käänteisesti päätellä ilmoitettujen turbiinitehojen olevan monessa tapauksessa liioiteltuja. Tämä on syytä huomioida valinnoissa ja valmistajan luotettavuutta arvioitaessa. C_p arvon hyvyyteen vaikuttavat valmistajan mahdolliset tekniset innovaatiot peruslaitteeseen, mutta vaikutus on toki rajallinen ja esiintyy vain tietyissä käyttöpisteissä!

Turbiineita läpikäydessä tuli myös esille miten eri valmistajilla on omanlaisensa sähköiset liitynnät. Kaikki valmistajat toki sisällyttävät generaattorin toimituskokonaisuuteensa, mutta vain harvat ajattelevat sen olevan jakeluverkkoon suoraan liitettävän. Tähän tietenkin vaikuttavat omat säännöksensä eri maissa ja alueilla, joten ilmeisesti pientuuliturbiinin valmistajat eivät halua ottaa kantaa tähän viitekehykseen siten kuin suurtuuliturbiinin valmistajat joutuvat saadakseen laitteistonsa kaupaksi.

Yleisesti voidaan katsoa pientuuliturbiinin syöttävän tuottamansa sähköön lämmöksi vastusten kautta varaajassa, tai akkuun josta se edelleen

konvertoidaan kulutuslaitteistoon paikallisena sähköjakeluna (maatila tai teollisuusrakennus).

4.8 Pientuulivoimalakohteita

Suomessa ei esitetyillä H-VAWT-mallin turbiineilla ole vielä merkittävää asennuskantaa, mikä tässä yhteydessä on myös oleellinen havainto - pioneeritoimintaa selvästi tarvittaisiin markkinoille!

Savonius(Winside)-tyyppisten tuuliruuvien valmistusta löytyy tosin myös Suomesta (liite 2). Savonius-tyyppisiä turbiineita on kokeiltu kattosovelluksina lähinnä kaupunkiympäristössä, yleensä erillisenä apusähkölähteenä esimerkiksi valaistukseen. Kyseisiä ratkaisuja löytyy Suomesta ja Pohjoismaista, hyvillä ja huonoilla kokemuksilla (liite 3).

Maailmalla kokeillaan myös erilaisia ilmanohjaimia tuulen kanavoimiseksi rakennusten yhteydessä esimerkiksi tuuliruuvien energiatheyden lisäämiseksi (liite 4).

Ruotsissa on ollut teollista pioneeritoimintaa suuremman luokan H-VAWT-mallin valmistamiseksi, mutta teollisena liiketoimintana tämä ei tiettävästi kuitenkaan ole edennyt (liite 5).

Pohjois-Karjalan Jakokoskella on ollut pilottiprojekti HAWT-mallisen pienturbiinin kokeilemiseksi lähinnä paikallisen lämmitysjärjestelmän osana. Projekti on edennyt aiottua hitaammin ja sitä on käsitelty laajemmin liitteessä 6.

Tämän opinnäytetyön tietopohjan avulla on arvioitu Karelia Ammattikorkeakoulun Sirkkalan kampuksen katolle mahdollisesti asennettavan H-VAWT-tyyppisen pientuulivoimalan toteutusta (liite 7). Kyseisen voimalan toteutusta ei kuitenkaan ole sisällytetty opinnäytetyön tavoitteisiin.

5. Pientuulituotannossa huomioitavaa

5.1 Lupamenettelyt

Pientuulivoiman rakentaminen ontuu pahasti epäselvän lainsäädännön vuoksi. Ongelmana on maankäyttö- ja rakennuslaki, joka ei sano selvästi, millaisen luvan pientuulivoimalan pystyttäminen vaatii. Lupasotku vaarantaa selvästi pientuulivoimamarkkinoiden kehittymisen Suomessa. Sotku johtuu siitä, että laissa ei sanota selvästi, milloin voimalaa pidetään rakennuksen osana edellyttäen rakennuslupaa (uusrakennus), ja milloin rakennelmana, joka maksimissaan edellyttää toimenpidelupaa. Käytännössä paikallinen rakennustarkastaja joutuu arpomaan päätöksen erikseen kunkin voimalan kohdalla. (Vuola 2012.)

Pientuulivoimalaa perustettaessa on erityisesti huomioitava, että kaava-alueella vaaditaan rakennuslupa tai toimenpidelupa voimalan maston (rakenteen) korkeudesta riippuen. Kaava-alueen ulkopuolella tyypillisesti vaaditaan vain toimenpidelupa. Rakennus- tai toimenpidelupahakemukseen on liitettävä karttaote tai asemapiirustus, johon on merkitty voimalan sijoituspaikka. Liitteeksi tarvitaan myös voimalan julkisivupiirros, jotta voidaan arvioida kuinka kauas voimala näkyy. Lupaharkinnassa on kaupunkikuvallisen tai maisemallisen tarkastelun ohella oleellinen merkitys laitteiden tuottamalla äänellä, sen taajuuksilla ja voimakkuudella.

Tuulivoimayhdistyksen mukaan kuluttajat ja liike-elämä eivät uskalla sijoittaa pientuulivoimaan, kun eivät tiedä, millainen paperisota yllämainitun mukaan on edessä. On todettu, että pientuulivoimalan rakennusluvista on kuntakohtaisia eroja. Kunnan rakennusjärjestys määrittää millainen lupa tarvitaan.

Asianajaja Lasse Vuolan, Asianajotoimisto Borenius Oy, mielestä lakiin pitäisi kirjata millä edellytyksillä pientuulivoimala voidaan sijoittaa ja rakentaa

toimenpideluvalla ja milloin tarvitaan rakennuslupa. Pientuotantolaitosten integroimiseen osaksi rakennettua ympäristöä tulisi olla selkeästi määritellyt kaavoitus-, hyväksymis- ja lupaprosessit. Epäselvyydet tarvittavien lupien suhteen ovat johtaneet kunnittain ja alueittain hyvin kirjaviin tulkintoihin. Tarvitaan selkeä ja kaikkia viranomaisia velvoittava asetus siitä, miten eri energiamuotojen pientuotantolaitokset voidaan integroida osaksi rakennettua ympäristöä. Esimerkiksi pientuulivoiman osalta epäselvyydet olisivat ratkaistavissa asettamalla kriteerit maankäyttö- ja rakennuslakiin tai asetukseen kirjauksella: ”Alle xx metriä korkean ja pyyhkäisypinta-alaltaan alle xxx neliömetrin pientuulivoimalan rakentaminen voidaan toteuttaa toimenpideluvalla. Jos pientuulivoimala rakennetaan ranta-alueelle, alle xx metriä korkea ja pyyhkäisypinta-alaltaan alle xxx neliömetrin tuulivoimala tarvitsee toimenpideluvan. Muissa tapauksissa tuulivoimalan rakentamiseen vaaditaan rakennuslupa”. (Vuola 2012.)

Suurten tuulivoimaloiden sijoitusalueiden suunnittelu pohjautuu selvityksiin, joissa on huomioitu sekä teknistaloudelliset näkökohdat että ympäristöseikat. Vaikutusten selvittämisen tarkoituksena on jo suunnittelun aikana saada tietoa suunnitteluratkaisujen merkityksestä ja siten parantaa lopullisen suunnitelman laatua. Mikäli hanke on merkitykseltään YVALain 4 §:n 2 momentin mukainen, se todennäköisesti aiheuttaa laadultaan ja laajuudeltaan laissa tarkoitettuja merkittäviä ympäristövaikutuksia. Nämä vaikutukset ovat luonteeltaan sekä pysyviä että väliaikaisia.

Siis mikäli pientuulivoimalan rakentamisessa ei päästä yhteisymmärrykseen lupamenettelystä, saattaa se joutua painimaan samassa sarjassa suurempien voimalahankkeiden ympäristövaikutusarvio-menettelyn mukaisesti. Näin koska hankkeella saattaa paikallisesti olla merkittäviä vaikutuksia maisemakuvaan, suojelualueisiin, linnustoon, maatalouden harjoittamiseen sekä virkistyskäyttöön, jotka selvitetään ympäristövaikutusten arviointimenettelyssä. Kyseinen prosessointi on kuitenkin kohtuuton tässä yhteydessä etsittävien erilliskäyttöjen perustamiseksi.

5.2 Tuulivoiman vastustus

Tarkasteltavien pientuulisovellusten (turbiinien) on laajimmillaankin kuuluttava paikallisten viranomaisten toimenpidelupakäsittelyn piiriin. Mikäli menettelyä on jo sovellettu, mutta ympäröivä asutus haluaa kuitenkin rakentamisesta valittaa, on se mahdollista.

Valitusoikeus rakennus- ja toimenpidelupapäätöksestä on

- 1) viereisen tai vastapäätä olevan alueen omistajalla tai haltijalla
- 2) sellaisen kiinteistön omistajalla ja haltijalla, jonka rakentamiseen tai muuhun käyttämiseen päätös voi olennaisesti vaikuttaa
- 3) sillä jonka oikeuteen, velvollisuuteen tai etuun päätös välittömästi vaikuttaa
- 4) kunnalla.

Ennen rakentamista kannattaa siis kysyä myös naapureilta, miten he suhtautuvat tuulivoimalaan ja ajateltuun hankkeeseen. Liian varovainen ei varmasti asiassa voi olla. Yleensä voimalan korkeat rakenteet koetaan esteettisenä haittana, minkä arvuuttaminen on hyvin subjektiivista. Vaikka työssä käsiteltävät VAWT-tuulivoimalan rakenteet eivät ehkä kuulukaan tähän kategoriaan, edustavat ne haja-asutusalueella esimerkiksi jonkinlaista siiloon verrattavaa rakennetta, joka voi myös luonnostaan aiheuttaa välkyntää. Taajamassa kattoasennuksena saatetaan joutua ehkä toisenlaisen vastustuksen eteen. Läheistä pyörivää esinettä pidetään helposti stressiä edistävänä tekijänä.

Yksi syy vastustukseen ovat tuulivoimaloiden oletetut äänihaitat. Tuulivoimalan äänet muodostuvat ensisijaisesti sen roottorinlapojen liikkeestä. Roottorin pyörimisestä aiheutuu jaksollinen käyntiääni, jonka taso muuttuu roottorin pyörimisnopeuden vaihdellessa. Toinen, puuskuttava ääni muodostuu roottorin lavan sivuuttaessa tornin. Tämän äänen voimakkuuteen vaikuttaa lavan ja tornin välinen etäisyys – kyseinen ääni ilmenee kuitenkin vain suurten vaaka-akselisten voimaloiden yhteydessä.

Suurten tuulivoimaloiden koneistot ovat modernin tekniikan ansiosta myös entistä hiljaisempia. Generaattori, mahdollinen vaihteisto ja muut järjestelmät eivät aikaansaa yhtä hallitsevia ääniä kuin turbiinin muut käyntiäänet.

Pystyakseliset tuulivoimalat ovat yleisesti äänettömämpiä kuin vaaka-akseliset. Tuuliturbiinin siivet liikkuvat VAWT-tyyppisessä rakenteessa tuulen halki/läpi huomattavasti hitaammin kuin HAWT-rakenteessa. Hitaampi siiven nopeus korreloi yleisesti pienempään äänen emissioon synnyttävässä kohteessa. (Gipe 2009, 22–23.)

Moderneissa VAWT-tyyppisissä tuulivoimaloissa käytetään lähes poikkeuksetta myös ns. suoravetoisia kestopagneettigeneraattoreita turbiiniakseliin, joka on suoraan kytkettynä turbiinin akseliin ilman vaihdelaatikkoa. Siten vaihdelaatikosta usein johtuvat meluhaitat eliminoiduvat jo rakenteellisesti. Kyseisiä eri voimalatyyppejä äänihaittoja tutkittaessa on todettu VAWT-tyyppisen laitoksen tuottavan vain yleisenä pidettävän taustamelun (radiolähetys) tasoista ääntä, joka mittauksissa on todennettu olevan alle 30 dBA. (McLaren 2007.)

Myös esitetyt VAWT-tyyppisten tuulivoimaloiden asennuspaikat lieventävät mahdollista äänihaittaa luonnostaan. Haja-asutusalueella asennuskorkeus on vain alle 10 m luokkaa, joten ääni eri kantaudu lainkaan suurten voimaloiden kaltaisesti vapaassa ilmakehässä. Toisaalta taajama oloissa kattoasennuksena rakennusten muodot estävät äänen kantautumista maantasolle.

Johtopäätöksenä äänihaitoista pientuulivoimaloiden ja varsinkin pystyakselisten mallien kyseessä ollessa on, että tuulennopeuden yltyessä voimistuu tuulen aiheuttama taustaääni nopeammin kuin tuulivoimalan aiheuttama käyntiääni. Siten tuulivoimalan käyntiääni erottuu suurilla tuulennopeuksilla tuulen kohinasta vain laitoksen välittömässä läheisyydessä, jos lainkaan. Tuulivoimaloita suunniteltaessa sijoituksella ja maisemoinnilla voidaankin useimmiten hälventää äänestä nousevaa vastustusta.

5.3 Suunnittelussa ja valinnoissa huomioitavia asioita

Tässä opinnäytetyössä ehdotetaan määritellyn käyttökohteeseen pientuulivoimalaksi H-VAWT-mallia. Kuten valmistajien tiedoista on havaittava, kohdennetulta teholuokaltaan ne ovat fyysisesti (mitat, paino) merkittävän kokoisia laitteita/laitoksia. Siten asennuksia suunniteltaessa on syytä erikseen ottaa huomioon seuraavan kaltaisia asioita toiminnallisuuden varmistamiseksi.

- Tuulivoimalan perustan riittävä lujuus maalle (maaperä) rakennettaessa, kuin myös taajamassa kattoasennuksissa; kattoasennuksessa on syytä ottaa asia huomioon jo rakennuslupahakemuksen yhteydessä (suunnittelu).
- Henkilösuojaus, mikä ei suoraan kuulu minkään asetuksen alle tässä yhteydessä, kuitenkin esim. lasten ja eläinten pääsy pyörivän koneiston läheisyyteen on estettävä sekä toisaalta kattoasennuksissa turvalliset kulkureitit on huomioitava.
- Koska tuulen nopeus vaihtelee yleisesti lyhyin muutaman minuutin ja myös pidempiaikaisesti useamman tunnin sykleinä, on huomioitava tästä johtuva huojunta/vilkkuminen tuotetussa sähkössä (jännite, taajuus), mikä johtaa mahdollisesti myös paikallisen sähköverkon epästabiloitumiseen. Tämä voidaan estää johtamalla pienturbiinin voimalinja muuntimen (konvertteri) kautta, tai tasaavaan akkuun ja sieltä edelleen kohdennettuun käyttöverkkoon (jakeluverkkoon).
- Mikäli hyväksyttäviä ohjeistuksia vaaditaan, esimerkiksi paikallisten hyväksyntöjen takia, on kansainvälisesti pientuulivoimalan suunnitteluun tuotettu ohjeistoa auttamaan suunnittelua (EN 61400–2:2006: Design Requirements for Small Wind Turbines).
- On huomioitava, että tuulivoimalan toimintalämpötila vaihtelee -30:stä + 40:een °C asteeseen, mutta tavallisesti voimalan tuotto arvioidaan

käyttämällä ilmakehän normilämpötilan (+15 °C) vastaavaa ilmantiheyttä teholaskennassa.

- Mahdollinen ajoittainen lapojen jäätyminen täytyy ottaa huomioon asennuksissa Suomessa. Esimerkiksi uudelleen käynnistymisen estyminen tyynen kylmän jakson jälkeen sekä mahdollinen jääaineksen sinkoutuminen siivistä on huomioitava.
- H-VAWT-tyyppisten voimaloiden kattoasennuksessa tulisi erityisesti kiinnittää huomiota mahdollisten värähtelyiden tuomiin haittoihin. H-VAWT-tyyppiselle pientuulivoimalalle on monimutkaisen roottoridynamiikan takia tyypillistä ns. erikertaluokan mekaaniset resonanssivärähtelyt. Valmistajat ovat varmasti suunnitelleet rakenteensa riittäväksi vastustaa tätä värähtelyä niin, ettei se vahingoita itse voimalan rakenteita. Perustuksena oleviin kattorakenteisiin johtuessaan nämä värinät kuitenkin saattavat aiheuttaa yllättäviäkin ongelmia. Nämä resonanssitaajuuudet olisi syytä saada selville joko valmistajalta tai mittaamalla voimalan tuennan ja kattorakenteen suunnittelua varten. Edelleen rakenteet tulisi säännöllisesti kuulua huoltotarkastusten piiriin lisäkustannusten välttämiseksi. (Heilmann 2010.)

Tuuliturbiinin valintaan voi soveltaa esimerkiksi saksalaisen ohjeiston (BWE 2013) listaa, mitä vähimmillään pientuulivoimalaitoksen valintaa varten tulisi päättää tai tietää:

- maksimi suunniteltu (haluttu) antoteho
- tuulisuus läpi vuoden valitulla tuulennopeudella ja korkeudella
- siipien geometriset mitat ja turbiinin ajateltu napakorkeus (valmistajat)
- On ja Off nopeusalueet minimituoton evaluoimiseksi
- turbiinin tuottama korkein jännite ja virta kytkettävyyden takia
- tuuliturbiinin tuottama melu mitattuna eri etäisyydellä (taajama-asennus).

5.4 Huolto ja operointi

Tuulivoimaloiden huoltotarve on vaativampaa kuin yleisesti ajatellaan. Huoltotyöt eivät rajoitu vain laakerien kunnossapitoon vaan myös sähköiset osat, mekaniikka, perustukset ja kaiken kattava varaosakäsittely on huomioitava. Kyseisten osa-alueiden ammattimainen hoitaminen vaatii myös osaavan henkilöstön ja koulutuksen.

Mahdolliset uudistukset ja asennuspaikan vaihdokset maa-alueen käytön muuttuessa tai tekniikan muuttuessa vaativat suunnittelua ja projektiosaamista. Myös varaosatarjonnan seuraaminen on huomioitava, koska valmistajat saattavat muuttaa toimintaansa tai lopettaa toimintansa alalla kokonaan (paikallinen varastointi).

Tyypilliset huoltojaksot tuulivoimala-alalla, jotka tosin verifioituvat suurtuulivoimaloiden kunnossapidosta, ovat yleiset vuosihuollot, 3 tai 5 vuoden välein tapahtuvat kuluvien osien uusinnat sekä elinkaaren varmistus- ja jatkohuollot 10 tai 20 vuoden käytön jälkeen.

Pientuulivoimala tulee aikanaan myös elinkaarensa päätökseen, joten rakenteiden hävittäminen ympäristönormit huomioiden kuuluu myös voimalan operointiin. Säädöksiä siitä, tulisiko esimerkiksi valmistajan osallistua tähän, ei saatavissa olleessa aineistossa käsitelty lainkaan. Asia kuitenkin tulee esiin tulevaisuudessa, mikäli sovellukset yleistyvät.

6. Yhteenveto

6.1 Tulosten tarkastelu

Työn teoriaosuuteen on koottu perusinformaatiota tuulienergian käytettävyyden tarkastelemista varten ilmastollisesta näkökulmasta. Myös alan kirjallisuus ja artikkelit lähtevät hyvin usein tästä näkökulmasta, miten tuulivarannot ja tuulusuus voidaan määrittää. Valitettavasti kohdennettua tietoa koskien eritoten pientuulisovelluksia ja hyvin paikallisia ns. mikrometeorologisia lain-alaisuuksia ei kirjallisuudesta löydy. Tältä osin viitataan vain paikallisten mittausten merkittävyyteen.

Tutkitun kirjallisuuden ja löydettyjen sovellusten perusteella voidaan kuitenkin todeta, että pientuulen resurssien evaluointiin voidaan lähtötietoina hyvinkin käyttää Tuuliatlaksen tuulitietoja paikkatietoon perustuen. Tästä tarkennusta asennuspaikkakohtaisesti voidaan edelleen tarkentaa tuulen profiilin logaritmisuuden avulla sekä ottaen huomioon paikalliset maastorajoitukset ja rakennuskannan. Paikallisten esteiden vaikutusta teoreettisesti on työn yhteydessä myös esitelty. Tarkemman asennuspaikan vuotuiset tuulimittaukset ovat tuuliresurssien tarkentamiseksi kuitenkin suositeltavia. Liitteinä esitettyjä asennuskohteita onkin tarkasteltu juuri tästä näkökulmasta.

Laitteistojen osalta tuulesta saatava energia on verrannollinen siihen sijoitettavan tuulivoimalarakenteen siipien pinta-alaan, mikä työssä tarkasteltavassa H-VAWT-mallissa on suoraan siipien korkeuden ja leveyden rajaama neliö. H-VAWT-mallien hyötysuhde on kuitenkin alhainen joka johtaa suurempiin rakenteisiin toivotulla tehoalueella (> 4 kW). Alalla on kuitenkin selvästi havaittavissa kiinnostusta tutkijapiireissä sekä valmistajien puolesta kehittää tämän tyyppin tuulivoimaloita uusien innovaatioiden avulla. Kilpailu mitä ilmeisimmin luo edellytyksiä laitemallin yleistymiselle pientuuliratkaisuissa.

Työn puitteissa esiin tulleet legaalit asiat ja niiden tila osoittavat alan nuoruutta. Selvät säännökset näyttävä puuttuvan ja koska pientuulisoveltajat ovat hyvin yleisesti vielä yksityisiä henkilöitä, on heidän erittäin vaikea nähdä pitkäjänteisesti ratkaisun kannattavuutta energiatarpeidensa tyydyttämiseksi. Paikalliseen rakennustoimen hallintoelimeen, mikä tämä milloinkin sitten onkaan, on syytä olla yhteydessä jo alusta alkaen. Samalla myös naapurustoa on kuultava.

Suoranaista pientuulen vastustusta ei käsitelty lähdeaineiston mukaan niinkään esiinny. Ympäristövaikutukset, kuten ääniongelmia ja esteettisyys, on syytä kuitenkin huomioida suunnittelussa, koska tuulivoimaan yleisesti liittyy näiden takia vastustusta. Kerätyn tiedon pohjalta esitetyn H-VAWT-mallisen tuulivoimalan kyseiset haitat ovat minimaalisia rinnastettaessa suurvoimaloihin, josta vastustus kumpuaa.

Pienvoimaloiden suunnitteluun ja toteutukseen tieto on selvästi vielä hyvin hajanaista, ja esitetyt kohdat on löydetty pirstaleisesti käytetystä lähdemateriaalista. Oleellista toteutuksessa on onnistuneet tuulimittaukset ja tämän jälkeen voimalan valinta sijoituspaikan tarjoamien rakenteiden mukaisesti. Laskennallisesti voidaan toki voimalan tuottoa edeltä evaluoida, mutta vasta valmis käyttöönotettu rakennelma tulee näyttämään mihin vuotuinen tuotto tulee asettumaan.

Huoltoon ja operointiin ei pientuulisovelluksista myöskään löytynyt teoreettista tai kokemusperäistä aineistoa. Esitetyt kohdat kuitenkin ovat realistisia ja otettu suurvoimaloita käsittelevästä aineistosta tähän yhteyteen mukaan.

6.2 Pohdinta

Yleisesti voidaan todeta, että kaupallinen toiminta pientuulisovelluksissa on maassamme vielä olematonta. Näin myös globaalisti. "Pientuulen kehitystä hidastaa, ettei missään maailmalla ole teollista tuotantoa alalla. Vain Kiinassa

löytyy volyymiä, mutta valmistus sielläkin on vielä hyvin käsityömäistä", kuten kansainvälisen pientuulijärjestön edustaja konferenssissa hiljattain totesi.²

Työssä esitellyn H-VAWT-mallisten pientuulivoimaloiden hidasta yleistymistä kuvaa myös markkinatutkimuksen luvut, joiden mukaan HAWT-teknologia on dominoinut markkinoita viimeisen 30 vuoden ajan (Small Wind World Report 2012). Tutkimuksen mukaan 327 valmistajasta v.2011 lopulla 74 % investoi HAWT-malleihin, kun vain 18 % investoi VAWT-malleihin ja 6 % molempiin tekniikoihin. Pääosa kaupallisista VAWT-malleista on syntynyt vasta viimeisten 7 vuoden aikana ja markkina on pysynyt pienenä. Keskimääräinen tehoalue on ollut noin 7,4 kW, mikä toisaalta on selvästi korkeampi kuin vastaavilla HAWT-malleilla. Näitä kyseisiä (H-)VAWT-malleja on työssä käsitelty liitteen 1 mukaisesti. Erilaisia käyttökohteita ajatellen tutkimus toteaa myös, että yli 80 % toteutetuista pientuulivoimaloista on toiminnassa erilliskäyttöinä paikallisesti jakeluverkkoon kytkemätöminä, kuten tässä työssä kohdennettu käyttökohteet.

Professori Olli Pyrhösen, LUT, mielestä pienvoimala on käytännöllinen, jos sähköä tarvitaan vain vähän tai verkkoa ei ole. Hänen mukaan omakotitalojen kattokorkeudella tuulen nopeus ylittää harvoin 5 m/s, jolloin sähköenergiaa saadaan neliöltä talteen noin 22 W/m², sekä toisaalta pienroottorien hyötysuhde jää tyypillisesti 25...35 % välille luokittelematta turbiinintyyppiä. Myöskään huollontarvetta ja tästä seuraavia kustannuksia mutkikkaamman mekaniikan ja liikkuvien osien takia ei tulisi unohtaa. (Tekniikan Maailma 2012.) Tähän voi hyvin yhtyä tarkastellessa ilmenneiden tuulivarojen pienuutta Sirkkalan kampuksella liitteen 7 mukaisesti.

6.3 Liiketoimintaan liittyvät mahdollisuudet

Esitetyn H-VAWT-tyyppisten pientuulisovellusten yleistäminen vaatii selvästi uusien liiketoimintamallien esiinmarssia, jotta esimerkiksi työn alussa esitelty Pohjois-Karjalan pientuulitavoitteet voisivat täyttyä.

² (Stefan Gsänger, WWEA (World Wind Energy Association), CWEE7i, Shanghai 8.10.4.2013)

Turbiinien valmistus kyseisessä kokoluokassa ei ilmeisesti maassamme tulisi kannattavaksi, skaalaetujen aikaansaaminen on tuskin mahdollista. Tarjonnan luonti toimimalla maahantuojana ei ehkä ole kannattavaa yhdellä tuoteryhmällä ilman laajempaa markkinaa (Suomi on pieni paikka). Muiden, kuin tässä yhteydessä esitettyjen, mallien ja aurinkoenergiasovellusten osalta toimintaa yhdistettynä onkin harjoitettu jo jonkin aikaa.

Uutta liiketoimintamallia voisi esittää haettavaksi lämpötalkkarimallista biopolton tai maalämpöhankkeiden yhteydestä (projektit ja muut palvelut). Kustannukset voisivat jakautua elinkaarimallin mukaan saavuttaen siten etuja sekä käyttäjälle, että toimittajalle. Ongelmana lyhyellä tähtäimellä on löytää sopiva toiminnan taso (kannattavuus) sekä pitkällä tähtäimellä sitoutuminen pitää kiinni toimintamuodosta (pysyvyys on asiakkuuden kulmakivi).

Ns. ”Tuulitalkkari” liiketoimintana voisi kehittyä palvelu/leasing liiketoimintana, jonka tuotteistettua tarjontaa voisivat olla esimerkiksi:

- tuuliresurssien mittaukset ja tuoton arvioiminen paikan valinnassa
- lupamenettelyjen konsultointi
- tekninen suunnittelu
- kaupunkiin kattojen asennusten arviointi/osaaminen
- laitetoimittaja (maahantuonti, jatkuva yhteys valmistajiin)
- elinkaaren mukainen huoltaja (valmistajan valtuutus)
- jatkuva kunnossapidon seuranta/simulointi.

Esitettyä liiketoimintamallia ei tämän työn laajuudessa kuitenkaan ole kokeiltu.

Lähteet

- ABB. 2011. ABB Technical Application Papers No.13, Wind power plants. Italy: L.V. Breakers, SACE, Bergamo.
- Borenus Oy. 2012. <http://www.noemissionmonday.com/community/wp-content/uploads/2012/05/LASSE-PTV-Sitra-20120507.pdf>. 13.01.2013.
- British Wind Energy Association. 1982. Wind Energy for the Eighties. UK.
- BWE Bundesverband WindEnergie e.V. 2013. Kleinwindanlagen. 2.Auflage. Berlin. Deutschland.
- D'Ambrosio, M. & Medaglia, M. 2010. Vertical Axis Wind Turbines: History, Technology and Applications. Master thesis in Energy Engineering. Halmstad Högskolan, Sweden.
- Da Rosa, A.V. 2005. Fundamentals of Renewable Energy Processes. USA.
- Dabiri, J. O. 2011. Potential order-of-magnitude enhancement of wind farm power density via counter-rotating vertical-axis wind turbine arrays. USA: Journal of renewable and sustainable energy 3, 043104.
- Entra Eindom. 2013. <http://e24.no/naeringsliv/tester-ut-vindkraft-paa-posthuset/20360204>. 24.4.2013.
- ERD. 2013. <http://www.erd.qc.ca/ebroch.html>. 22.4.2013.
- Envento. 2013. http://envento-windenergie.com/en/20_faqs.php. 24.4.2013.
- Folkecenter. 2013. www.folkecenter.netgbrdwind/energyhouseholdturbines/denmarkpics_small_windturbines. 22.4.2013.
- Formentini, G., Gobbi, A., Griffa, A. & Randi, P. 2006. Temporal e Tornado. Milano: Alpha test S.r.l.
- Gasch, R. & Twele, J. 2012. Windkraftanlagen. 7. Auflage. Deutschland.
- Gipe, P. 2009. Wind Energy Basics, 2nd Edition. UK.
- Green Building Council Finland. 2013. <http://figbc.fi/kira/kohteet/viikin-ymparistotalo>. 25.4.2013.
- Heilmann, C. 2010. REDUCING VIBRATION ISSUES AT SMALL VERTICAL-AXIS WIND TURBINES ON BUILDINGS. SmallWind EWEC 2: Abstract ID:177.
- Heino, R. 1997. Klimatologian Perusteet. 3. painos. Luentomoniste. Helsinki: Helsingin Yliopisto Meteorologian laitos.
- Hitachi. 2013. http://www.hitachi.com/environment/showcase/solution/energy/wind_velocity.html. 23.4.2013.
- IEEE. 2012. <http://ieeexplore.ieee.org/search/searchresult.jsp?newsearch=true&queryText=VAWT>. 5.10.2012.
- Karttunen, H., Koistinen, J., Saltikoff, E. & Manner, O. 2002. Ilmakehä ja sää. 4. painos. Helsinki: Tähtitieteellinen yhdistys Ursa.
- Khammas, A. 2007. Das Buch der Synergie. http://www.buch-der-synergie.de/c_neu_html/c_08_08_windenergie_senkrechtachser.htm. 11.3.2013.
- Latikka, J. 2013. Sähköposti, Ilmatieteen laitos, 26.8.2013.

- Liftwind 2013. Yhtiön internet-sivut. Kiinan Kansantasavalta:
http://www.liftwind.cn/EN/en_products_view.php?id=245. 13.3.2013.
- McLaren, D. 2007. Experimental Measurement of Noise Production by a Small Scale Vertical Axis Wind Turbine. ME 742 – Acoustics. US.
- Neuhäuser. 2013. <http://www.neuhaeuser-windtec.de/de/home.html>. 20.4.2013.
- Pohjois-Karjalan Maakuntaliitto. 2011a. Sisä-Suomen tuulivoimaselvitys & Pohjois-Karjalan potentiaaliset tuulipuistoalueet. Projekti YTJ 035.
- Pohjois-Karjalan Maakuntaliitto. 2011b. Pohjois-Karjalan ilmasto- ja energiaohjelma 2020. Julkaisu 145. 34–35.
- Räsänen, J. 2004. Kasvihuoneilmiön voimistuminen ja sen vaikutukset. Luentomoniste. Helsinki: Helsingin Yliopisto Fysikaalisten tieteiden laitos Ilmakehätieteiden osasto.
- Savijärvi, H. & Vihma, T. 2001. Rajakerroksen Fysiikka I. Luentomoniste. Helsinki: Helsingin Yliopisto Fysikaalisten tieteiden laitos.
- Sitra. 2012. Keskustelupaperi.
http://www.sitra.fi/sites/default/files/u489/sahkon_pientuotanto_keskustelupaperi_2012-9-3.pdf. 28.1.2013.
- Sähkömarkkinalaki. 17.3.1995/386.
<http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1995/19950386?search%5Btype%5D=pika&search%5Bpika%5D=s%C3%A4hk%C3%B6markkinalaki#L1P3>. 28.1.2013..
- Tekniikan Maailma. 2012. Kodin Energia erikoisnumero. No.18E. Otava Media.
- Turunen, T. 2012. Pientuulivoimalan valinta käyttötarkoituksen ja Terttulanvaaran tuuliolojen mukaan. Opinnäytetyö. Pohjois-Karjalan Ammattikorkeakoulu, Sähkötekniikan koulutusohjelma.
- Tuuliatlas. 2009. <http://www.tuuliatlas.fi>. 28.4.2013
- Twidell, J. & Weir, T. 2006. Renewable Energy Resources, Second edition. UK: Taylor & Francis.
- Vengerwind. 2013. <http://vengerwind.com/learn/technical.html>. 24.4.2013.
- Vuola, L. 2012. Selvitys pientuulivoimalan sijoittamista koskevan lupalain-säädännön taloudellisesta tehokkuudesta. Asianajotoimisto Borenus & Kempainen Oy.
- Wikipedia 2013. <http://fi.wikipedia.org/wiki/Savonius-roottori>. 23.4.2013
- World Wind Energy Association. 2012. Small Wind Report.
http://wwindea.org/home/index.php?option=com_content&task=view&id=349&Itemid=41. 16.10.2012.

Valmistaja	Maa	Malli	Tyyppi H/S/Hy	Siivet lkm	Teho (kW)	Nopeus (rmp)	Tuuli (m/s) in/off/max	Nim (m/s)	Napakor- keus (m)	Tuulipinta l(m)*k(m)=ala(m2)	Cp lask.	Pitch (on/ei)	Paino (kg)	
Kowa	JP	20kW	H	3	19,9		2.5/21/52.5	9	24,0	17,2 11,0	189,2	0,236	ei	15000
		10kW	H	3	9		2.5/21/60	12	12,0	6,0 5,0	30,0	0,283	ei	6000
		4kW	H	3	4		2.5/21/60	12	10,8	4,0 4,0	16,0	0,236	ei	4500
SAWT Inc	CN	P-3000	H	5	3		4/25/50	12	5,5	3,0 3,6	10,8	0,262	(on)	650
		P-5000	H	5	5		4/25/55	12	5,5	4,0 4,6	18,4	0,257	(on)	975
		PK-10	H	5	10		4/25/55	12	5,5	6,0 6,2	37,2	0,254	(on)	2375
		PK-50	H	4	50		2/30/60	13	11,5	12,0 9,0	108,0	0,344	on	12000
UGE	US	4K	H	3	4	125	3,5/30/55	12		3,0 4,6	13,8	0,274	ei	461
		9M	H	3	10	55	3,5/n/50	12		6,4 9,6	61,4	0,154	ei	4000
HiVAWT	TW	DS-3000	H	3	3	200	3/15/60	12	4,0	4,0 4,2	16,6	0,170	ei	680
Toyoda Tech	CN	TYD600	H	3	10	300	2/n/60	12	na	4,6 6,0	27,6	0,342	ei	1600
		TYD350/C4	H	3	8	300	2/n/60	12	na	4,6 5,0	23,0	0,329	ei	
Bernoulli	CN	CZ-5	H	3	5	60	1,8/15/28	7	12,0	10,0 2,5	25,0	0,952	on	
		CZ-10	H	3	10	60	1,8/15/28	7	12,0	14,0 2,5	35,0	1,360	on	
		CZ-20	H	3	20	60	1,8/15/28	8	12,0	16,0 2,5	40,0	1,594	on	
		CZ-30	H	3	30	60	1,8/15/28	8	14,0	17,0 2,5	42,5	2,251	on	
		CZ-50	H	3m	50	60	1,8/15/28	8	16,0	19,0 2,5	47,5	3,357	on	
		CZ-100	H	3m	100	40	1,8/15/28	9	18,0	24,0 2,5	60,0	3,733	on	
		CZ-200	H	3m	200	40	1,8/15/28	10	18,0	32,0 2,5	80,0	4,082	on	
		CZ-300	H	3m	300	40	1,8/15/28	10	18,0	35,0 2,5	87,5	5,598	on	
		CZ-500	H	3m	500	40	1,8/15/28	10						
Gildemeister	DE	WindCarrier	H	3	10	124	3/16/n	12,0	9,7	4,7 8,5	40,0	0,237	ei	2500
quietrevolution	UK	qr5	H	3	7		5/26/n	13,5	18,0	3,0 5,5	16,5	0,282	ei	

Valmistaja	Maa	Malli	Tyyppi H/S/Hy	Siivet lkm	Teho (kW)	Nopeus (rmp)	Tuuli in/off/max	Nim (m/s)	Napakor- keus (m)	Tuulipinta l(m)*k(m)=ala(m2)	Cp lask.	Pitch (on/ei)	Paino (kg)
Mailing Energy	CN	MLV-5000	H	3	5	100	2/n/50	12,0	12,0	4,2 4,9 20,5	0,231	ei	950
Silent Future Tec	AT	SFT-V4.2	H	3	4,2	165	3/13/50	11,3		4,0 4,0 16,0	0,297	ei	1000
		SFT-V8-12	H	3	12	110	3/13/50	12,5		6,0 5,3 31,8	0,315	ei	1500
		SFT-V15-20	H	3	20	85	3/13/50	12		8,0 7,5 60,0	0,315	ei	2000
Fairwind	BE	F16.05	H	3	5	180	2,5/20/55	12	18,0	4,0 4,0 16,0	0,295	ei	1085
		F16.10	H		10	185	3/20/55	15	18,0	4,0 4,0 16,0	0,302	ei	1200
		F36.10	H		10	100	2,5/20/55	11,5	18,0	6,0 6,0 36,0	0,298	ei	1420
		F36.20	H		22,5	115	3/20/55	14	18,0	6,0 6,0 36,0	0,372	ei	1600
		F64.10	H		10	70	2,5/20/55	10	24,0	8,0 8,0 64,0	0,255	ei	1760
		F64.40	H		40	106	3/20/55	14	24,0	8,0 8,0 64,0	0,372	ei	2450
Heos-energy	DE	H75	H	3	75	55	3/16/32	12	38,0	15,0 15,5 232,5	0,305	ei	
Evento windenergy	DE	ENV-L	H	3	10	155	3/n/n	14	9,5	5,0 6,0 30,0	0,198	On	670
Neuhäuser	DE	H5	H	3	5	94	2,9/16/30	10,5	10,0	5,2 5,8 30,2	0,234	Ei	
		H10	Hy	2	10	95	2,8/32/50	13	10,0	6,0 5,6 33,6	0,221	Ei	
		H40		3	40	40	3,5/18/30	13	24,5	12,0 11,0 132,0	0,225	Ei	
Vengerwind	US	V2 Turbo	S		4,5	300	4/27/35	15,2	1,0	1,3 4,8 6,2	0,338	ei	800
WindTec	DE	SpinWind	H	3	10	120	3/16/n	12	9,0	4,7 8,5 40,0	0,237	Ei	3000
Taisei Techno	JP	5.5	H	5	5,5		2,8/n/60	12,0	5,0	6,0 4,2 25,2	0,206	Ei	620
		10	H	3	10		2,8/n/40	12,0	13,0	6,0 9,0 54,0	0,175	Ei	1500
Envergate	CH	ev312g	H	3	3,6		n/n/n	12,5	8,0	2,5 3,1 7,8	0,386	On	6000
		ev600	H		12		n/n/n	11,5	15,0	4,0 6,1 24,2	0,533	On	17000
		ev1200	H		60		n/n/n	12	22,0	10,0 12,0 120,0	0,472	On	100000

Valmistaja	Maa	Malli	Tyyppi H/S/Hy	Siivet lkm	Teho (kW)	Nopeus (rmp)	Tuuli (m/s) in/off/max	Nim (m/s)	Napakor- keus (m)	Tuulipinta l(m)*k(m)=ala(m2)	Cp lask.	Pitch (on/ei)	Paino (kg)
Windside	FI	WS-2L	S	2			2/n/20	n	10,0	1,0	2,0	ei	120
		WS-2B	S	2			2/n/40	n	10,0	1,0	2,0	ei	550
		WS-2AK	S	2			2/n/60	n	10,0	1,0	2,0	ei	1000
		WS-4A	S	2		1000	2/n/60	n	10,0	1,0	4,0	ei	1200
		WS-4B	S	2		1000	2/n/40	n	10,0	1,0	4,0	ei	800
		WS-12	S	2	5-15		2/n/40	n	10,0	2,0	6,0	ei	6000

Winside-tuuliturbiinit Helsingin kaupungin Viikin ympäristötalon katolla (kuva 1), jossa asennus on vielä uusi ja sitä hyödynnetään vain erillisen turvavalaistuksen akkujen lataukseen (Green Building Council Finland 2013).



Kuva 1. Winside-kattoturbiineja. (Jaakko Vähämäki/Vastavalo.fi.)

Kattoturbiiniasennuksia

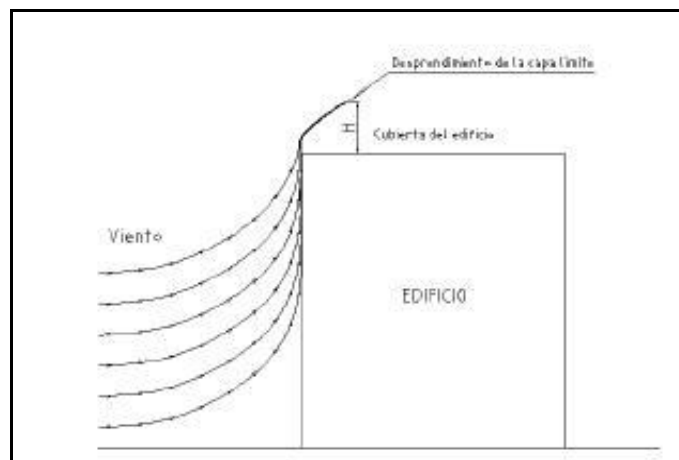
Sovellus Norjasta, jossa Entra Eindom on kokeillut WindStream Technologies (US) yhtymän isoja tuuliruuvi-mallisia turbiineita Norjan Postin rakennuksen katolla Osllossa (kuva 2). Turbiinit ovat hajonneet 22 m/s tuulen nopeudella, vaikka valmistaja on luvannut niiden kestävän aina 35 m/s nopeuden. Hajoamisesta huolimatta yhtiö kaavailee uusia asennuksia toimistotalojen katoille Tronheimiin, todistaakseen turbiinien soveltuvuuden kaupunkiympäristössä. (Entra Eindom 2013.)



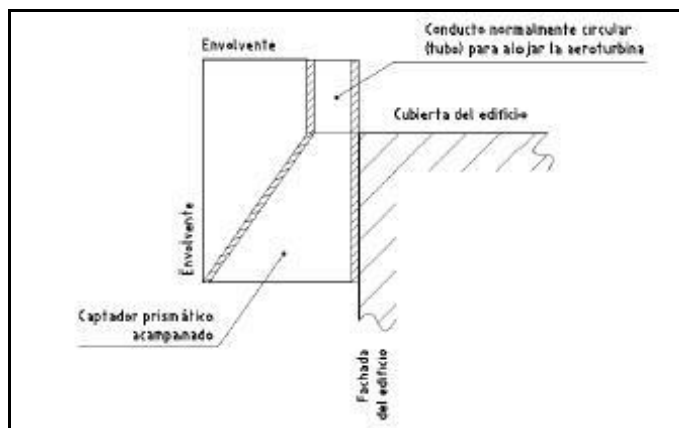
Kuva 2. Kattoturbiineita Norjassa. (Entra Eindom 2013.)

Kanavatyyppiset rakenteet

Kanadalainen ERD yhtiö markkinoi kanava-tyylistä kattoturbiinia (ERD 2013). Periaatteena on rakennuksen julkisivun kohtaaman nousevan virtauksen ”kaappaaminen” räystäs-kulmalla erillisten ilmanohjain rakenteiden avulla. Oheiset kuvat havainnollistavat ajatusta, mutta toteutettavien rakenteiden paino tulisi varmaan ottaa talojen suunnittelussa erikseen huomioon (kuvat 1 ja 2).



Kuva 1. Kuvaus nousuvirtauksen kaappauksesta.



Kuva 2. Kanavan rakenteesta.

Ruotsin H-VAWT kokeilut

Vuonna 2002 perustettu ruotsalainen yritys VerticalWind, jonka erikoisala oli alhaisen nopeuden generaattorit, yhteistyössä Uppsalan yliopiston kanssa ovat tehneet kehitystyötä uudenlaisen pysty akselisen tuulivoimalan ympärillä. Tästä yhteistyöstä syntyi vuonna 2006 ensimmäinen prototyyppi, 12 kW Giromill-tyyppinen tuulivoimala (kuva 1).



Kuva 1. 200 kW H-VAWT. (D'Ambrosio & Medaglia 2010.)

Ensimmäisen prototyypin rakentamisen ja suorituskyvyn mittausten jälkeen seuraava askel oli rakentaa isompi teholtaan 200 kW turbiini. Vuonna 2010 VerticalWind AB rakensikin Uppsalan Falkenbergiin suurimman VAWT-mallisen tuulivoimalan mitä Ruotsissa löytyy (kuva 2).



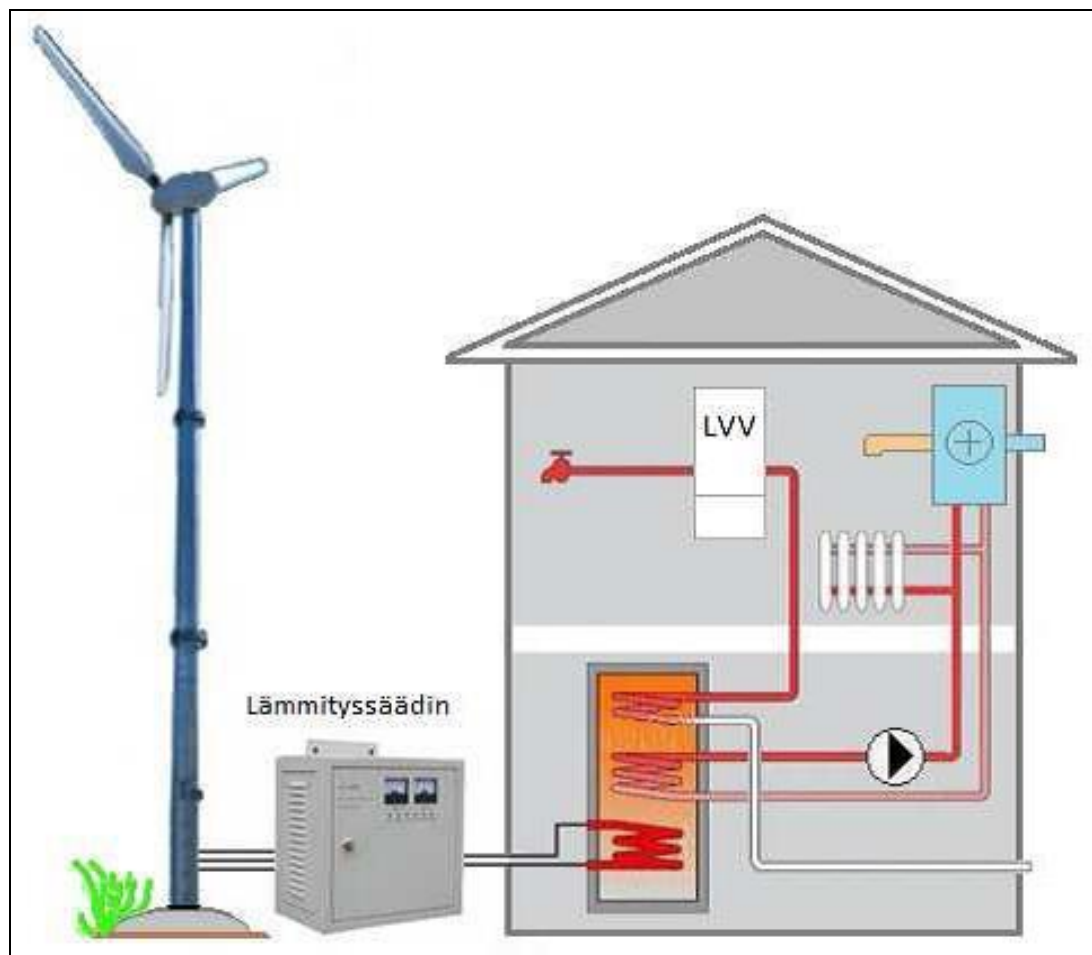
Kuva 2. VerticalWind Giromill tuulivoimala. (D'Ambrosio & Medaglia 2010.)

Turbiinissa on 3 siipeä, nimellisteho on 200 kW ja 40 m korkea torni on rakennettu puumuovikomposiittista, jonka on tarkoitus tehdä turbiinin rakenteesta halvempaa kuin teräksestä valmistettaessa. Roottorin halkaisija on 26 m ja siipien, joiden materiaalina on käytetty lasikuitua, pituus 24 m. Painoa laitteistolla on 300 kg. Sijaintipaikkana on avara tasainen esteetön peltoalue, johon myöhemmin on suunniteltu muodostuvan kymmenen tuulivoimalan puisto valtatie E6 varteen.

Yllä esitellyt tuulivoimalat ovat toistaiseksi tehty koemielessä ja niillä on tutkittu kokeellisesti hyötysuhteita (C_p), sekä rakenteellisia resonanssi värähtelyitä, jotka ovat tyypillisiä kyseisen tuuliturbiinin rakenteessa. (D'Ambrosio & Medaglia 2010.)

Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulun opinnäytetyönä Turunen (2012) on myös kaavailtu pientuulivoimalan perustamista Jakokosken Tähtikalliolle Terttulanvaaraan. Työn tavoitteena oli mitata ja määrittää tuulivoimalan sijoituspaikan tuulusuus sekä valita tuulioloihin soveltuva pientuulivoimala.

Tuulivoimalan käyttötarkoituksena on ajateltu kohteessa sijaitsevien kokoontumistilojen lämmitysenergian tuottaminen niin, että voimala syöttää kaiken sähkötehonsa suoraan ilmanvaihtohuoneen vesivaraajan vastukseen (kuva 1). Mitään sähköä varastoivaa akkua tai muuta järjestelyä ei siis käytetä.



Kuva 1. Tuulivoimalan liittämiseksi varaavaan sähkölämmitysjärjestelmään. (Turunen 2012.)

Kuvassa 2 on nähtävissä tuulivoimalan oletettu tuleva sijaintipaikka. Paikkaa arvioitiin tuulivoimalalle ihanteelliseksi sen korkeuden ja avoimuuden johdosta juuri niihin ilmansuuntiin, joista tuuli vaaralla yleisimmin tulee. Myös tuulimittaukset on suoritettu tällä paikalla.



Kuva 2. Tuulivoimalan sijoittuminen Tertulanvaaran maisemaan. (Turunen 2012.)

Tuulimittaukset kohteessa osoittautuivat työn edetessä oletettua haasteellisemmaksi, eikä mittausdataa saatu ehjänä ja yhtenäisenä vuoden mittausjaksona. Siten mittausdatasta käytettiin vain aikaan saatuja ehjiä mittausjaksoja, joita suhteutettiin Tuuliatlaksesta saatavaan, saman paikan ja saman ajanjakson pitkäaikaiseen keskituulennopeuteen 50 m:n korkeudessa.

Tuulivarojen selvittämiseen käytettiin erillistä analysointiohjelmaa, ja myös Weibull-jakauma kohteen tuulioloista on laskettu tuulivoimalan energian tuoton arviointiin tarkoitetulla Web-ohjelmalla.

Jakokosken Tähtikallio

Työssä selvitettiin ja huomioitiin myös seuraavia asioita

- voimalan tehon mitoittamiseksi kuormana toimivan varaajan lämmitystehon tarve laskettiin
- tuulivoimalan näkyvyyttä ja esteettisyyttä maisemassa arvioitiin
- voimalasta aiheutuvaa meluhaittaa arvioitiin; todettiin se tuulen itsensä aiheuttaman äänen suhteen merkityksettömäksi
- vaikutus linnustoon suojelualue määräysten mukaan arvioitiin; ei tulisi vaikeuttaa voimalan pystytystä
- alueen rakennusjärjestyksen mukaan tuulivoimalan rakentaminen kohteessa vaatii toimenpideluvan hakemisen, jos voimalan korkeus on 20 – 50 m; tehon määräyksessä laskentaan otettu voimala on roottorinlapoineen noin 23 m korkea kun maston korkeudeksi valitaan 18 m, toisin sanottuna toimenpidelupa ja siihen tarvittavat selvitykset olisi siis tehtävä, jos päätös voimalan hankinnasta tehdään.

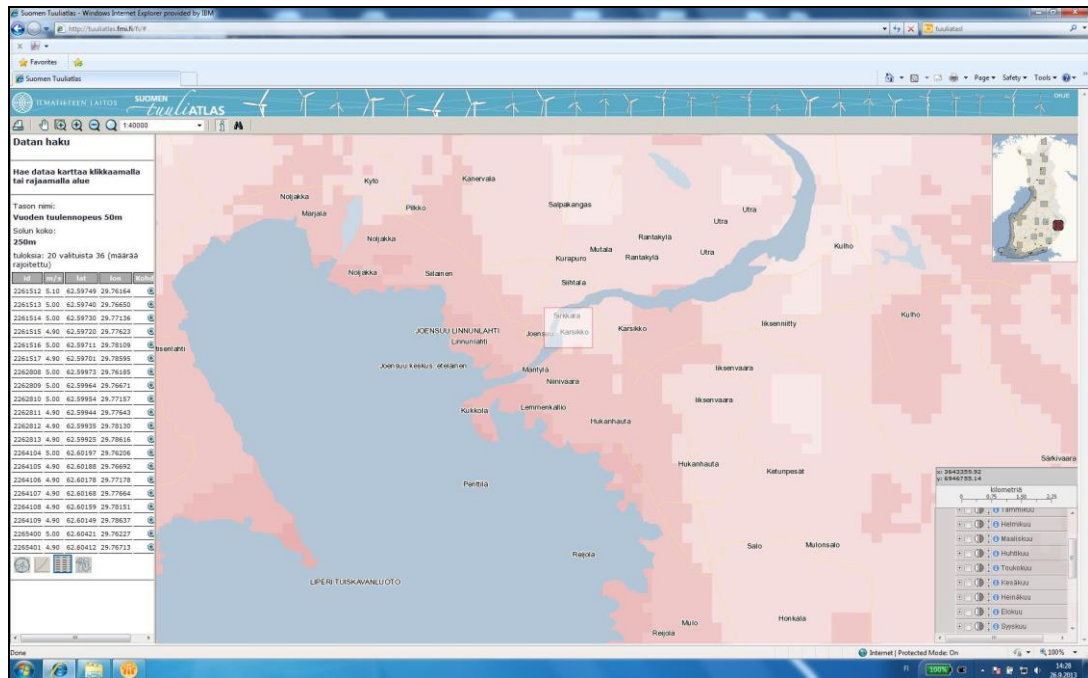
Kuvassa 3 on kyseinen asennuspaikka pysty akselisen tuulivoimalan sijainnin katselmoimisen aikaan. Ympäristössä näkyvä kasvillisuus ja puusto sekä tähtitornirakennuksen rakenne eivät mahdollista esteetöntä noin 5-10 metrin korkuista asennus alustaa VAWT-tyyppiselle voimalalle. Jotta tuulivaroihin päästään kiinni, on Turusen ehdottama HAWT-tyyppinen ratkaisu selvästi realistisempi. Evaluointia ei kohteessa jatkettu katselmointia pitempään.



Kuva 3. Asennuspaikka kesällä 2013. (Kirjoittajan kuva)

Karelia AMK Sirkkalan kampus

Tässä liitteessä on selvitetty opinnäytetyön tietopohjaan perustuen pystyakselisen tuulivoimalan sijoittamista Karelia Ammattikorkeakoulun Sirkkalan kampuksen katolle Joensuussa. Koska sijoituspaikalla ei ole tehty tuulimittauksia, perustuvat lähtötiedot tässä yhteydessä Tuuliatlaksen keskiarvotietoihin.





Kuva 2. Sirkkalan tuulen nopeusprofiili Tuuliatlaksessa.



Kuva 3. Kampuksen rakennusten muodot. (Kirjoittajan kuva)

Kuvassa 3 on kampuksen rakennukset julkisivukuvana. Vasemmalla olevan kampuksen siiven korkeus on arviolta noin 10 m, ja ilmeisesti rakenteista korkein. Kyseinen korkein kohta ei ympäristöä tarkastellessa ehkä kuitenkaan ole sopivin läheisen hotellirakennuksen takia. Hotelli korkeutensa takia toimii virtausten esteenä sekä turbulenssin aiheuttajana. Virtausten esteettömyyden suhteen oikealla oleva kampuksen korkeampi osuus rakenteissa on ilmeisemmin sopivin kohta tuulivoimalalle kattoasennuksena. Rakennusta ja

Karelia AMK Sirkkalan kampus

sen teknistä valmiutta ei tässä yhteydessä kuitenkaan ole katselmoitu, joten rajoituksia voi toki esiintyä muitakin. Katolle sijoitettavan tuulivoimalan esteettistä vaikutelmaa ei tässä yhteydessä arvioida. Kuvan 28 mukaisesti laskennallinen napakorkeus on aiemmin esiteltujen liitteessä 1 pysty akselisten turbiinien mukaisesti noin 15 m.

Valitun kattoasennus kohteen tuulisuutta voidaan arvioida taulukon 1 mukaan. Koska tarkasteltavana ovat pysty akselimalliset tuulivoimalat, tuulen suunnalla ei tässä yhteydessä ole merkitystä. Kohteen (id 2265403) tuulennopeustiedot (50m) kuukausitasolla on saatavilla Tuuliatlaksesta, ja kohteen asennuskorkeuden (15m) tuulennopeudet voidaan laskea logaritmisesti alustan rosoisuus huomioiden. Laskennassa on käytetty haja-asutusalueen rosoisuutta kuvaa arvoa (0,2), mikä Sirkkalan ympäristöä ehkä kuvaavin.

Taulukko 1. Sirkkalan asennuspaikan tuulennopeudet.

	Tuuliatlas id 2265403	Karelia Amk kampus
Keskiarvo	m/s (50m)	m/s (15m)
Vuotuinen	4,8	3,8
tammikuu	5,8	4,6
helmikuu	5,3	4,2
maaliskuu	4,8	3,8
huhtikuu	4,4	3,5
toukokuu	4,5	3,5
kesäkuu	4,2	3,3
heinäkuu	4,2	3,3
elokuu	4,1	3,2
syyskuu	5	3,9
lokakuu	5,3	4,2
marraskuu	5,6	4,4
joulukuu	5,1	4,0

On selvästi havaittavissa, että asennuspaikassa vaikuttavat tuulennopeudet jäävät hyvin pieniksi jopa tuulisimpina kuukausina. Tietenkin on muistettava,

että tässä tarkastellaan vain keskiarvoja pidemmällä aikavälillä tietämättä tarkempaa jakaumaa aikajaksojen sisällä, tai puuskaisuutta alueella. Näiden selvittämiseksi kohteessa olikin tehtävä kattava vuoden pituinen tuulennopeusmittaus verifiointia varten.

Mikäli kuitenkin mittausten jälkeen tuulisuus on todettava yllä esitetyn tasoiseksi, on työssä läpikäydyn tietopohjan perusteella todettava, että kohteessa ei nykyisellään tehokkaampia (>5 kW) H-VAWT-tyyppisiä tuulivoimaloita voitane soveltaa. Rajoituksina verrattaessa liitteen A laitteisiin ovat karkeimmillaan

- kohteen tuulennopeus alle ilmoitettujen nimellisnopeuksien, teho/tuotto jää alle nimellisen; mahdollisesti ylitetään vain käynnistysnopeus
- valmistajien vaatimat napakorkeudet ovat noin kaksi kertaa kampuksen korkeus, joten rakennusmääräykset saattavat estää näin merkittävän rakentamisen.

Vaihtoehtoisesti kohteessa voitaisiin kokeilla liitteessä 2 esitettyjä Windside-tyyppisiä tuuliruuveja räystäsasennuksina, kuten liitteissä 3 ja 4 on käsitelty. Tällöin tämän opinnäytetyön (teho/tuotto) rajausta ei kuitenkaan täyty.

Muunlaista, kuin kattoasennusta, tuulivoimalalle ei alueella voitane suunnitella. Kampuksen maa-alueella tällainen voisi toteutua vain mittavan korkean mastorakenteen avulla, johon kaupungin keskustassa rakennuslupaa ei myönnettäne.